

dr inż. Tomasz Kotowski

Załącznik 2

Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

**Autoreferat prezentujący
cykl publikacji powiązanych tematycznie
oraz pozostałe osiągnięcia naukowe**

Kraków, kwiecień 2019

1. DANE PERSONALNE, WYKSZTAŁCENIE I PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ	3
1.1 IMIĘ I NAZWISKO	3
1.2 POSIADANE STOPNIE NAUKOWE I DYPLOMY	3
1.3 PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ	3
2. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO	3
3. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO STANOWIĄCEGO PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	5
3.1 TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	5
3.2 WYKAZ PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	5
3.3 KRÓTKI OPIS CYKLU I CELÓW PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	6
4. GŁÓWNE WYNIKI PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	8
4.1 REZULTATY OZNACZEŃ STĘŻEŃ HE W KENOZOICZNYCH POZIOMACH WODONOŚNYCH ZLEWNI GWDY PRZY WYKORZYSTANIU METODY GC	8
4.2 ZASTOSOWANIE METODY GC/TCD OZNACZANIA HE, NE I AR W WODACH PODZIEMNYCH DO OCENY ICH WIEKU, NA PRZYKŁADZIE WÓD Z REJONU BUSKA-ZDROJU	10
4.3 ZASTOSOWANIE POMIARÓW STĘŻEŃ GAZÓW ROZPUSZCZONYCH W WODZIE PODZIEMNEJ, DANYCH HYDROCHEMICZNYCH I IZOTOPOWYCH DO OKREŚLENIA WARUNKÓW KRĄŻENIA I WIEKU WÓD PODZIEMNYCH W ŚRODKOWYCH SUDETACH	12
5. WSKAZANIE NAJWAŻNIEJSZYCH OSIĄGNIĘĆ CYKLU PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	16
6. MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE UZYSKANYCH WYNIKÓW	16
7. POZOSTAŁE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE	17
7.1 UZUPEŁNIAJĄCA DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWA ZWIĄZANA Z BADANIAMI GAZÓW ROZPUSZCZONYCH W WODACH PODZIEMNYCH	17
7.2 GŁÓWNE ZAGADNIENIA POZOSTAŁEGO DOROBKU NAUKOWO-BADAWCZEGO	18
7.2.1 <i>Krótki opis publikacji stanowiących pozostały dorobek naukowo-badawczy</i>	18
7.2.2 <i>Rozpoznawanie i opis procesów kształtowania się chemizmu wód podziemnych</i>	19
7.2.3 <i>Analiza genezy i wieku wód podziemnych na podstawie oznaczeń izotopowych</i>	22
7.2.4 <i>Określenie źródła pochodzenia wybranych składników wód podziemnych</i>	22
7.2.5 <i>Analiza wpływu eksploatacji wód podziemnych na ich skład chemiczny</i>	23
7.2.6 <i>Wykorzystanie wód termalnych w aspektach poza energetycznych</i>	25
7.2.7 <i>Analiza struktury eksploatacji i bezpośredniego wykorzystania wód podziemnych</i>	25
7.2.8 <i>Hydroenergetyczne wykorzystanie wód powierzchniowych i jego wpływ na wody podziemne</i>	26
7.2.9 <i>Pozostałe zagadnienia badawcze niezwiązane bezpośrednio z hydrogeologią</i>	27
7.3 STAŻE NAUKOWE	28
7.4 PROJEKTY BADAWCZE	28
7.5 KONFERENCJE NAUKOWE	29
7.6 RECENZJE	30
7.7 NAGRODY ZA OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE	30
8. LITERATURA	31

1. DANE PERSONALNE, WYKSZTAŁCENIE I PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ

1.1 Imię i nazwisko

Tomasz Kotowski

1.2 Posiadane stopnie naukowe i dyplomy

- ✓ Doktor nauk o Ziemi w dyscyplinie geografia. Stopień doktora uzyskałem na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydziale Biologii i Nauk o Ziemi, dnia 13 czerwca 2008. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Chemizm wód podziemnych w regionalnym systemie krążenia wód podziemnych w zlewni Gwdy*. Promotor prof. dr hab. Andrzej Sadurski. Recenzenci: prof. dr hab. Stefan Krajewski i prof. dr hab. Jacek Motyka.
- ✓ Magister inżynier, kierunku inżynieria środowiska w zakresie: hydrogeologia, geologia inżynierska i ochrona wód. Dyplom uzyskałem na Akademii Górniczo-Hutniczej, Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, w lipcu 1999. Tytuł pracy: *Symulacja naprężeń oraz prognoza osiadań w podłożu projektowanego składowiska odpadów komunalnych Barycz III*. Promotor dr inż. Janusz Herzig.

1.3 Przebieg pracy zawodowej

1999–2000: Chemkop Label Sp. z o.o. w Krakowie, stanowisko: laborant

2000–2008: Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Wydział Biologii i Nauk o Ziemi, Instytut Geografii, Zakład Geologii i Hydrogeologii, stanowisko: asystent

2008–2010: Polska Akademia Nauk, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Zakład Energii Odnawialnej, stanowisko: adiunkt

2011–2019: Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, stanowisko: adiunkt

2. PODSUMOWANIE DOROBKU NAUKOWEGO

Jestem autorem/współautorem 42 publikacji, z czego 34 opublikowałem po uzyskaniu stopnia doktora. Zestawienie publikacji opublikowanych przed/po uzyskaniu stopnia doktora znajduje się w załączniku 5. Liczba publikacji opublikowanych w czasopismach znajdujących się na liście JCR (Journal Citation Report) wynosi 6. Sumaryczny Impact Factor (IF) tych publikacji wynosi 9,513, a sumaryczna liczba punktów na podstawie punktacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) wynosi 404. Według bazy Scopus, liczba cytowań publikacji wynosi 4 (bez autocytacji), a indeks Hirscha wynosi 1. Według bazy Google Scholar (Publish or Perish), liczba cytowań publikacji wynosi 14¹ (bez autocytacji), a indeks Hirscha jest równy 3. Mój udział autorski we wszystkich pracach opublikowanych po doktoracie wynosi 61%. Liczba prac indywidualnych wynosi 4. Zbiorcze zestawienie dorobku naukowego znajduje się w tabeli 1. Szczegółowe informacje o wskaźnikach bibliometrycznych poszczególnych publikacji znajdują się w tabeli 2.

¹ Uwzględniłem także dwa cytowania publikacji B.21 i B.26 zamieszczone w *The Use of Geothermal Waters in Podhale in Terms of Tourism and Industrial Applications*. Bugajski P., i in., 2017 - J. Ecol. Eng. 2017; 18(6):185–191, (DOI: 10.12911/22998993/75692), które nie są indeksowane z uwagi na błędny opis bibliograficzny.

Tabela 1. Zestawienie zbiorcze osiągnięć pracy naukowej

Wyszczególnienie	przed doktoratem	po doktoracie	ogółem
Prace opublikowane	8	34	42
W tym prace: w czasopismach z listy JCR	0	6	6
w innych czasopismach	3	26	29
w materiałach konferencyjnych	2	0	2
w monografiach i raportach naukowych	0	2	2
Mapy Hydrogeologiczne Polski 1:50 000	3	0	3

Tabela 2. Zestawienie dorobku naukowego według wskaźnika Impact Factor (IF) oraz według oceny punktowej wykazu czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW)

Czasopismo	Język publikacji	Liczba publikacji	Impact Factor ¹⁾	Punkty wg MNiSW ¹⁾
Czasopisma naukowe posiadające współczynnik wpływu IF (baza Journal Citation Reports)				
Journal of Hydrology	ENG	1	3,727	45
Groundwater	ENG	1	2,307	35
Environmental Earth Sciences	ENG	1	1,765	25
Polish Journal of Environmental Studies	ENG	1	0,600	15
Polish Journal of Environmental Studies	ENG	1	0,462	13
Environment Protection Engineering	ENG	1	0,652	15
Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika IF, indeksowane w bazie Web of Science i/lub Scopus				
Geologos	ENG	1		14
Journal of Ecological Engineering	ENG	1		12
Przegląd Geologiczny	POL	6		12 (72) ²⁾
Przegląd Geologiczny	POL	1		6
Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego	POL	4		4 (16) ²⁾
Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego	POL	1		6
Czasopisma naukowe nieposiadające współczynnika IF				
Gaz, Woda i Technika Sanitarna	POL	1		11
Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich	POL	3		10 (30) ²⁾
Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumietus	POL	1		10
Instal	POL	1		7
Gaz, Woda i Technika Sanitarna	POL	5		6 (30) ²⁾
Environmental Problems	ENG	2		5 (10) ²⁾
Acta Universitatis Nicolai Copernici,	POL	1		4
Technika Poszukiwań Geologicznych	POL	1		2
Recenzowane prace naukowe spoza wykazu MNiSW				
Rozdział w monografii	POL	1		5
Mapa Hydrogeologiczn Polski 1:50 000 (wraz z objaśnieniami)	POL	3		5 (15) ²⁾
Cykliczne materiały konferencyjne Współczesne Problemy Hydrogeologii	POL	2		3 (6) ²⁾
Pozostałe publikowane prace naukowe				
Raporty naukowe	POL	1		0

¹⁾ - IF oraz punktacja MNiSW zgodna z rokiem opublikowania²⁾ – suma punktów dla publikacji o jednakowej punktacji

3. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO STANOWIĄCEGO PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), które przedstawiam do oceny jest cykl publikacji powiązanych tematycznie.

3.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie jest zatytułowany:

Rozwój metodyki badań gazów rozpuszczonych w wodach podziemnych w celu określania warunków krążenia i wieku tych wód

3.2 Wykaz publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

A.1 - **Kotowski T.**, Najman J., 2015 – *Results of the determination of He in Cenozoic aquifers using the GC method.*

Groundwater, 53: 47–55, DOI: 10.1111/gwat.12311, (MNiSW - 35 pkt., IF=2,307)

Mój udział autorski wynosi 60% i obejmuje:

zaprojektowanie badań terenowych i wybór studni do opróbowania;

wykonanie badań terenowych i pobór prób do oznaczeń laboratoryjnych;

opracowanie koncepcji artykułu;

wykonanie kwerendy literaturowej i opracowanie rozdziałów opisowych/wprowadzających;

wykonanie obliczeń wieku wód podziemnych przy zastosowaniu metody helowej i radiowęglowej, określenie niepewności datowania przy użyciu metody helowej względem najważniejszych parametrów obliczeniowych, określenie głównych procesów kształtujących skład chemiczny wód podziemnych, charakterystyka zmienności mineralogicznej obszaru badań (suplement elektronicznej publikacji), określenie genezy wód podziemnych na podstawie analizy zmienności izotopów stabilnych;

zestawienie wyników badań, edycję tekstu i wykonanie rycin;

przeprowadzenie interpretacji i dyskusji wyników badań;

sformułowanie wniosków i/lub podsumowania pracy;

odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie poprawek - jako autor korespondencyjny.

A.2 - Najman, A., **Kotowski T.**, Kasela, T., Bielewski J., Śliwka I., 2017 - *Zastosowanie metody GC/TCD oznaczania*

He, Ne i Ar w wodach podziemnych do oceny ich wieku, na przykładzie wód z rejonu Buska-Zdroju. Przegląd Geologiczny, 65: 1130–1133, (MNiSW - 12 pkt., IF=0)

Mój udział autorski wynosi 40% i obejmuje:

wykonanie kwerendy literaturowej i opracowanie rozdziałów opisowych/wprowadzających;

wykonanie obliczeń wieku wód podziemnych przy zastosowaniu metody helowej;

przeprowadzenie interpretacji i dyskusji wyników badań;

sformułowanie wniosków i/lub podsumowania pracy;

odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie poprawek.

A.3 - **Kotowski T.**, Chudzik L., Najman J., 2019 - *Application of dissolved gases concentration measurements, hydrochemical and isotopic data to determine the circulation conditions and age of groundwater in the Central Sudetes Mts.* Journal of Hydrology, 569: 735-752, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.013, (MNIŚW - 45 pkt., IF=3,727)

Mój udział autorski wynosi 65% i obejmuje:

opracowanie koncepcji artykułu;

wykonanie kwerendy literaturowej i opracowanie rozdziałów opisowych/wprowadzających;

wykonanie obliczeń wieku wód podziemnych przy zastosowaniu metody helowej i aktywności ^3H , modelowanie wpływu zawartości U i Th na wielkość wytwarzania ^4He *in situ*, określenie szybkości degradacji CFC, określenie wysokości obszarów zasilania i średnich temperatur infiltrujących wód opadowych na podstawie oznaczeń izotopów stabilnych i NGT, określenie warunków migracji jonów REE oraz U i Th, określenie warunków występowania i migracji gazów rozpuszczonych w wodzie;

zestawienie wyników badań, edycję tekstu i wykonanie rycin;

przeprowadzenie interpretacji i dyskusji wyników badań;

sformułowanie wniosków i/lub podsumowania pracy;

odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie poprawek - jako autor korespondencyjny.

Łączna wartość bibliometryczna publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe wynosi 92 punkty, sumaryczny Impact Factor według listy JCR wynosi 6,034, a mój udział autorski wynosi 55%. Oświadczenia współautorów prac wraz z określeniem ich indywidualnego wkładu pracy stanowi Załącznik 8.

3.3 Krótki opis cyklu i celów publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego

Metody znacznikowe są szeroko stosowane w badaniach środowiskowych, między innymi także w hydrogeologii. Pozwalają one na uzyskanie informacji o ośrodku wodonośnym, które często są niedostępne, lub trudne do określenia przy zastosowaniu innych metod badawczych. Metody oparte na wykorzystaniu znaczników środowiskowych pozwalają między innymi na: rozpoznanie warunków krążenia wód, określenie genezy i/lub zachowania się wybranych związków chemicznych w ośrodku wodonośnym (niekiedy także w strefie aeracji), czy też wyznaczenie wieku wód podziemnych. Jako znaczniki środowiskowe mogą być wykorzystywane zarówno naturalne, jak i syntetyczne związki chemiczne. Znacznikami w większości przypadków są substancje występujące powszechnie w środowisku (choćby niekiedy w bardzo małych stężeniach), które można oznaczać ilościowo przy wykorzystaniu nowoczesnych metod badawczych, takich jak spektrometria mas, czy techniki chromatograficzne.

Bardzo często w badaniach znacznikowych wykorzystywane jest również zjawisko efektu izotopowego atomów molekuł wody lub związków chemicznych rozpuszczonych w wodach podziemnych. Występowanie efektów izotopowych implikuje szereg odmiennych właściwości fizyko-chemicznych poszczególnych związków chemicznych, które przejawiają się między innymi w odmiennej szybkości wchodzenia w reakcje chemiczne, zróżnicowanej szybkości migracji i wieloma innymi zjawiskami, które powodują występowanie różnicowania izotopowego i w rezultacie pozwalają na badanie zachowania tych substancji w środowisku naturalnym.

W badaniach hydrogeologicznych wykorzystywane jest również zjawisko samorzutnego rozpadu promieniotwórczego, występujące w przypadku niektórych naturalnych i/lub sztucznych radionuklidów. Badania stężeń i/lub aktywności takich radionuklidów są wykorzystywane przede wszystkim do obliczeń wieku wód podziemnych, rozumianego, jako czas przebywania molekuł wody w systemie wodonośnym.

Często wykorzystywanymi znacznikami środowiskowymi są także gazy rozpuszczone w wodach podziemnych. Dotyczy to gazów atmosferycznych rozpuszczonych w infiltrującej wodzie opadowej lub rozpuszczających się bezpośrednio w wodzie podziemnej w trakcie przepływu przez strefę aeracji lub na kontakcie faz powietrze/woda w strefie saturacji (głównie w ośrodkach krasowych i/lub szczelinowych). Do badań hydrogeologicznych wykorzystywany jest gazowy izotop helu ^4He , który powstaje wynikiem rozpadu promieniotwórczego niektórych pierwiastków szeregów uranowych i torowego. Gaz ten powstaje głównie w obrębie płaszcza i/lub skorupy ziemskiej. Może też powstawać bezpośrednio w matrycy skalnej ośrodka wodonośnego zawierającej pierwiastki radioaktywne, co jest często określane, jako wytwarzanie ^4He *in situ*.

W publikacjach stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego wykorzystane były oznaczenia stężeń gazów rozpuszczonych w wodzie podziemnej (He, Ne i Ar, CFC-11, CFC-12 i SF_6), badania izotopowe ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{13}\text{C}$) oraz oznaczenia aktywności ^{14}C i ^3H . Dodatkowo wykonywano badania fizykochemiczne wód podziemnych obejmujące oznaczenia stężeń głównych i podrzędnych jonów, a w wybranych przypadkach także jonów metali ziem rzadkich (REE) oraz uranu i toru (U i Th). Badania prowadzono w obszarach reprezentujących ośrodki wodonośne odmienne zarówno pod względem litologii matrycy skalnej, geometrii pustek przewodzących wodę (porowe i szczelinowe), wieku skał tworzących ośrodek wodonośny (permo-karbon i trias, cenoman oraz miocen i plejstocen), jak i głębokości występowania wód podziemnych (strefa aktywnej wymiany i wody mineralne). Ujęcia wód podziemnych, które zostały opróbowane w trakcie prowadzonych badań w większości przypadków stanowią podstawowe i często jedyne źródło zaopatrzenia w wodę do picia i/lub celów gospodarczych w analizowanych obszarach. W kilku przypadkach badano próbki termalnych wód mineralnych mających status wód leczniczych.

Głównym celem badań zaprezentowanych w cyklu publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego było rozpoznanie warunków krążenia i wieku wód podziemnych w różnych typach ośrodków wodonośnych. W ramach tak sformułowanego celu głównego wyznaczono cele cząstkowe, które są między innymi związane z określeniem warunków występowania i migracji gazów rozpuszczonych w wodzie, a w niektórych przypadkach także z przeprowadzeniem analizy paleo-środowiskowej. Istotnym aspektem badań warunków krążenia jest określenie wieku wód podziemnych, który może być obliczany przy zastosowaniu różnych metod datowania. **Nowym elementem moich badań w kontekście dotychczas stosowanej metodyki badań z wykorzystaniem pomiarów stężeń He było określenie czynników, które mają wpływ na wyniki datowania tą metodą,** czyli oszacowanie niepewności datowania względem głównych parametrów obliczeniowych oraz określenie wpływu zawartości U i Th w warstwie wodonośnej i bezpośrednio w wodzie podziemnej na wielkość wytwarzania ^4He *in situ*. **W przypadku CFC-11 i CFC-12 nowatorskim elementem badań tych gazów było określenie zakresu maksymalnej szybkości degradacji tych gazów na dużych głębokościach w porowo-szczelinowym systemie wodonośnym.**

4. GŁÓWNE WYNIKI PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

4.1 Rezultaty oznaczeń stężeń He w kenozoicznych poziomach wodonośnych zlewni Gwdy przy wykorzystaniu metody GC

Koncepcja wykorzystania oznaczeń całkowitego stężenia He ($^3\text{He}+^4\text{He}$) do badań hydrogeologicznych została po raz pierwszy przedstawiona przez Zuber (2007) i Zuber i innych (2007). Według wspomnianych autorów pomiary ^4He dla celów datowania wód podziemnych mogą być zastąpione pomiarami całkowitego stężenia He, ponieważ zawartość ^3He jest bardzo mała i w większości przypadków może być pominięta. Stosunek $^3\text{He}/^4\text{He}$ zmienia się w zależności od typu środowiska geologicznego (Oxburgh i in., 1986) i może zmieniać się w czasie (Lupton i Evans, 2013), jednakże w większości przypadków nie przekracza $1,0 \cdot 10^{-5}$. W powietrzu atmosferycznym stosunek obu izotopów ($^3\text{He}/^4\text{He}$) wynosi $1,382 \pm 0,005 \cdot 10^{-6}$ (Mabry i in., 2013). Zatem do określenia wieku wód podziemnych metodą helową można wykorzystać całkowite stężenie He, które może zostać oznaczone przy wykorzystaniu metody chromatografii gazowej (GC) (Pusz i in., 2007), zastępując oznaczenia $^3\text{He}/^4\text{He}$ wykonywane do przy użyciu metody spektrometrii mas.

W publikacji A.1 badania zmienności stężeń He w wodzie podziemnej wykonano dla jednej, ciągłej strukturalnie warstwy wodonośnej o rozciągłości ok. 65 km występującej w obrębie zlewni Gwdy. W obrębie tej struktury wodonośnej pobrano próbki z 8 studni zlokalizowanych wzdłuż kierunku przepływu strumienia wód podziemnych. Próbki pochodzą z eksploatowanych w trybie ciągłym ujęć wód podziemnych, co zapewnia napływ wód bezpośrednio z warstwy wodonośnej. Badany ośrodek wodonośny występuje w obrębie połączonych, głębokich (ok. 80÷100 [m]) poziomów wodonośnych - piaszczystych osadów miocenu i dolnego plejstocenu, występujących lokalnie w bezpośrednim kontakcie hydraulicznym. W celach porównawczych pobrano także próbkę z płytkiego (ok. 40 [m]) poziomu plejstocenu. Zakres wykonanych badań obejmował pomiary stężenia He, oznaczenia izotopowe ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{13}\text{C}$), pomiary aktywności ^{14}C oraz analizy fizyko-chemiczne.

Przeprowadzone badania były jednymi z pierwszych w kraju praktycznych zastosowań pomiarów stężeń He w wodzie podziemnej uzyskanych przy wykorzystaniu metody GC. Uzyskane rezultaty wskazują na występowanie niskich stężeń He oraz niewielkie zróżnicowanie stężeń tego gazu podczas przepływu w strumieniu wód podziemnych na długiej drodze przepływu. Rozpatrując przepływ wód podziemnych, jako sumę składowych można stwierdzić, iż prawdopodobne jest występowanie pionowego (lub zbliżonego do pionowego) przesiąkania o znaczącym natężeniu. Przesiákanie to odbywa się poprzez warstwy rozdzielające piaszczyste poziomy wodonośne i/lub struktury łączące różne poziomy wodonośne (np. okna hydrogeologiczne). Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia ochrony wód podziemnych, ponieważ płytsze poziomy wodonośne są w obszarze badań znacznie zanieczyszczone antropogenicznie (B.30).

Pomiary stężeń He i aktywności ^{14}C pozwoliły na określenie wieku wód podziemnych w strumieniu wód podziemnych na odcinku o długości ok. 65 [km] (Tab. 3). Taka długość odpowiada drodze przepływu wód podziemnych od strefy zasilania do strefy drenażu w skali dużej zlewni.

Tabela 3. Obliczony nadmiar He, aktywność ^{14}C i wiek wody podziemnej

Studnia ¹⁾	He_{exc} [cm ³ STP·g ⁻¹]	^{14}C [pmC]	Wiek wody podziemnej metoda helowa [lata]	Wiek wody podziemnej metoda radiowęglowa [lata]
Spore	4,2±2,4	-	1000	-
Debrzno	6,7±1,7	47,1±1	1500	1700
Stara Wiśniewka	7,1±2,0	-	1600	-
Żłotów	9,2±2,1	46,4±1	2100	2000
Święta	9,2±2,0	-	2100	-
Śmiardowo Krajeńskie	13,7±3,0	-	3200	-
Wysoka	10,6±3,7	-	2400	-
Wysoka Mała	11,7±3,0	-	2700	-
Białośliwie	10,2±2,0	50,0±1	2400	1200

¹⁾ - Kolejność studni zestawiono zgodnie z kierunkiem przepływu wód podziemnych

Oszacowany, całkowity czas przebywania wód w systemie wodonośnym wynosi maksymalnie ok. 2700 lat. Obliczone wyższe wartości, rzędu 3200 lat, mogą być wynikiem ascensyjnego dopływu wód starszych, który najprawdopodobniej ma miejsce w obrębie erozyjnej struktury kopalnej występującej w tym rejonie (B.10). Natomiast wiek rzędu 2400 lat określony dla ostatniej studni na drodze przepływu (Białośliwie) wynika najprawdopodobniej z uruchomienia napływu wód młodszych z obszaru doliny Noteci, co potwierdzają także wyniki oznaczeń $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i ^{14}C (B.6). Obliczony wiek wód jest w dużej mierze zależny od wartości zewnętrznego strumienia He dopływającego z głębszego podłoża (J_{He}), która została oznaczony w sposób pośredni, poprzez kalibrację wyników helowych na podstawie wyników datowania ^{14}C .

W publikacji A.1 podjęto także próbę określenia niepewności datowania przy użyciu metody helowej względem głównych parametrów obliczeniowych, które są trudne do ustalenia i mogą się zmieniać w szerokim zakresie, tj. zewnętrznego strumienia He (J_{He}) i stężeń U i Th w matrycy skalnej ośrodka wodonośnego (c_{U} i c_{Th}). Dodatkowo została także uwzględniona niepewność oznaczeń nadmiaru He_{exc} za pomocą metody GC ($\sigma_{\text{He}_{\text{exc}}}$). Jako najbardziej prawdopodobny zakres zmienności stężeń U i Th w osadach fluwioglacjalnych występujących na obszarze pozbawionym złóż uranu przyjęto zakres jednego rzędu wielkości dla poszczególnych pierwiastków ($\pm 1,0 \cdot 10^1$ [ppm]). Niepewność oznaczenia J_{He} jest warunkowana niepewnością wyznaczenia wieku wód metodą radiowęglową (ok. 250 lat), ponieważ J_{He} został wyznaczony przy wykorzystaniu wyników uzyskanych tą metodą. Uzyskane wyniki wskazują, iż niepewność określenia wieku wód podziemnych ma zróżnicowany zakres (Tab. 4).

Tabela 4. Niepewność datowania wód podziemnych metodą helową względem wybranych parametrów

Parameter obliczeniowy	Niepewność (%) odniesiona do wieku wód podziemnych [lata]
zewnątrzny strumień He - J_{He}	(14%) 134-436
stężenie uranu - c_{U}	(13%) 126-411
stężenie toru - c_{Th}	(21%) 206-675
niepewność oznaczeń nadmiaru He - $\sigma_{\text{He}_{\text{exc}}}$	(20-57%) 393-855

Teoretycznie, w najbardziej niekorzystnym przypadku całkowita niepewność datowania może osiągnąć $\pm 68\div 105$ %. Poszczególne niepewności datowania mogą przyjmować wartości ujemne lub dodatnie niezależnie od siebie i w rezultacie mogą się nawzajem znosić. Dlatego też rzeczywista, całkowita wartość niepewności datowania w większości przypadków powinna być znacznie niższa niż $\pm 68\div 105$ %.

Moim zdaniem, wyniki uzyskane w publikacji A.1 mogą być zaliczone do wkładu w rozwój dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska ze względu na przedstawioną koncepcję oceny błędu datowania metodą helową zwykłych wód podziemnych w strefie aktywnej wymiany. Określenie wieku wód podziemnych ma istotne znaczenie przy ocenie podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia, ponieważ niezależnie od przyjętej definicji odporności wód podziemnych na zanieczyszczenia, wiek wód wskazuje bezpośrednio na stopień odporności na zanieczyszczenia pochodzące ze źródeł powierzchniowych. Przeprowadzona ocena niepewności datowania ma w dużym stopniu charakter uniwersalny, ponieważ została wykonana dla wód podziemnych występujących w bardzo często spotykanych warunkach hydrogeologicznych. Dlatego też, w konsekwencji, przedstawiona koncepcja oceny niepewności datowania metodą helową może zostać zaimplementowana dla większości zwykłych wód podziemnych ($TDS < 1,0 \text{ [g}\cdot\text{L}^{-1}]$) występujących w osadach kenozoicznych.

Uzyskane wyniki mają znaczenie także w skali lokalnej, ponieważ wskazują na możliwość występowania ascenzji wód z poziomów mezozoicznych dla kilku dużych ujęć, zlokalizowanych w obrębie erozyjnej struktury kopalnej w obszarze badań. W takim przypadku eksploatacja wód podziemnych powinna być prowadzona w taki sposób, aby nie dopuścić do nadmiernego dopływu wód z głębszego podłoża, które w tym rejonie charakteryzują się wyraźnie podwyższoną mineralizacją.

4.2 Zastosowanie metody GC/TCD oznaczania He, Ne i Ar w wodach podziemnych do oceny ich wieku, na przykładzie wód z rejonu Buska-Zdroju

Obszar południowej części synklinorium miechowskiego (rejon Buska-Zdroju, Krzyża i Kazimierzy Wielkiej) charakteryzuje się występowaniem unikalnych pod wieloma względami siarczkowych wód leczniczych. Występuje tam szereg izolowanych, rozdzielnych struktur wodonośnych, które rozpatrywane pojedynczo charakteryzują się niewielkim zróżnicowaniem głębokości zalegania i miąższości. Natomiast miąższość oraz głębokość występowania poszczególnych struktur wodonośnych względem siebie jest już znacznie zróżnicowana i zależy od warunków sedymentacji oraz silnie rozwiniętej tektoniki blokowo-łańdowej. Generalnie, system wodonośny, jako całość ma charakter zamknięty, jest ograniczony oraz praktycznie jest nieodnawialny hydrodynamicznie (Lisik, 2010), wobec tego mieszanie się różnowiekowych wód w tym przypadku nie występuje i/lub ma znikome znaczenie. Bardzo istotna jest również ewolucja geologiczna tego systemu wodonośnego związana z odprężeniem skorupy ziemskiej po ustąpieniu lądolodu ostatniego zlodowacenia (vistulian) i przemieszczaniem się względem siebie bloków tektonicznych w obrębie, których występują poszczególne struktury wodonośne. Badane struktury wodonośne występują w obrębie piasków i piaskowców cenomanu (kreda górna) na głębokościach w zakresie $460\div 750$ [m]. W ich obrębie występują termalne ($20,7\div 28,5$ [°C]),

lecnicze wody siarczkowe typu Cl-Na z podwyższoną zawartością pozostałych halogenków, o całkowitej mineralizacji rzędu kilkunastu [g·L⁻¹].

W publikacji A.2 przedstawiono wyniki datowania oraz oznaczeń NGT (Noble Gas Temperature) wód siarczkowych na podstawie pomiarów stężeń gazów szlachetnych (He, Ne i Ar) w próbkach wody pobranych z studni: Busko C-1, Cudzynowice GT-1 oraz Wełecz S-6. Do określenia wieku wód siarczkowych zastosowano metodę helową, która jako jedna z niewielu metod datowania pozwala na obliczenie wieku wód podziemnych znajdujących się w systemie wodonośnym znacznie dłużej niż kilkadziesiąt tysięcy lat (> 40 tys. lat). W publikacji A.2 przedstawiono także metodykę obliczeń stężeń gazów szlachetnych obejmującą szczegółowe omówienie niezbędnych parametrów obliczeniowych tj.; nadmiaru powietrza, współczynnika Bunsen'a oraz ciśnienia i temperatury w obszarze zasilania badanych wód podziemnych. Obszar badań jest szczególnie predysponowany do użycia metody helowej z uwagi na zrębową budowę geologiczną. Występują tu warstwy wodonośne o relatywnie stałej miąższości i jednocześnie dobrze izolowane od stropu, co uniemożliwia dyfuzyjną ucieczkę He.

Jednym z ważniejszych parametrów obliczeniowych metody helowej jest J_{He} , który ma kluczowy wpływ na poprawność określenia wieku wód. Ponieważ wartość J_{He} nie jest znana dla obszaru badań, a pośrednie wyznaczenie wartości J_{He} jest bardzo kłopotliwe w analizowanym przypadku, do obliczeń przyjęto wartość $J_{He} = 0,45 \cdot 10^{-6}$ [cm³ STP·cm⁻²·rok⁻¹] na podstawie danych prezentowanych przez Marty i in. (1993) dla obszaru Europy (basen paryski) o podobnej budowie geologicznej, tj. zbliżonym rodzaju skał i głębokości ich zalegania, formie synklinalnej oraz typie głębokiego podłoża. Ponieważ J_{He} może cechować się dużą zmiennością nawet w obrębie pojedynczej jednostki strukturalnej (Kulogoski i in., 2005) uzyskane wyniki mogą być obarczone dużym błędem. Wyniki datowania wód siarczkowych, oznaczenia He_{exc} i rezultaty NGT przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki NGT, nadmiar He_{exc} i wiek wody podziemnej

Otwór	NGT [°C]	He _{exc} [cm ³ ·STP·g ⁻¹]	Wiek wody podziemnej [lata]
Cudzynowice GT-1	7,6	7445±552	148 000
Busko C-1	10,2	10148±755	118 000
Wełecz S-6	3,6	7651±536	77 000

Wyniki NGT wskazują, iż wody siarczkowe mogły być zasilane zarówno w okresie interglacjalnym, jak i w okresie przejściowym pomiędzy glacjałem a interglacjałem. Obliczone wieki i oznaczone stężenia gazów szlachetnych są zbliżone do rezultatów uzyskanych przez innych autorów Zuber i innych (2010), którzy podają wiek wód siarczkowych w zakresie lat 90÷270 tys. lat wskazując, iż najbardziej prawdopodobnym okresem zasilania tych wód jest okres interglacjalny 75÷140 tys. lat temu. Jednakże, biorąc pod uwagę niejednoznaczne rezultaty NGT oraz niepewność wyników datowania podjęto próbę oceny możliwości wystąpienia zasilania wód siarczkowych podczas zlodowacenia Wisły (vistulian). Na możliwość zasilania wód siarczkowych w okresie glacialnym, a tym samym młodszy wiek tych wód (rzędu 40÷100 tys. lat) wskazuje kilka niezależnych przesłanek. Wody siarczkowe mogą być z dużym prawdopodobieństwem młodsze z uwagi na wyższe wartości J_{He} , które są także obserwowane w obszarze Europy. Przykładowo Castro i in. (1998) dla basenu paryskiego podaje $J_{He} = 4,48 \cdot 10^{-6}$ [cm³ STP·cm⁻²·rok⁻¹]. Przyjęcie J_{He} na poziomie $1 \div 5 \cdot 10^{-6}$ [cm³ STP·cm⁻²·rok⁻¹] powoduje,

iz analizowane wody siarczkowe uzyskują w większości wiek glacialny. Także zasięg lądolodu w tym okresie (Wysota i in., 2002), jaki i typ środowisk sedimentacyjnych występujących w tym czasie w obszarze środkowej Polski (głównie rzeczne i eoliczne według Ber i in., 2007), wskazują na możliwość istnienia (być może okresowych) systemów wodonośnych w warunkach klimatu peryglacialnego.

Moim zdaniem, wyniki uzyskane w publikacji A.2 mogą być zaliczone do wkładu w rozwój dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska ze względu na fakt, iż są nowym elementem badań nad mechanizmem zasilania wód siarczkowych, który do chwili obecnej nie jest jednoznacznie określony i wymaga dalszych badań. Uzyskane wyniki mogą także pomóc lepiej zrozumieć ewolucję geologiczną badanego systemu wodonośnego, która jest związana z izostatycznym odprężeniem skorupy ziemskiej, odnowieniem uskoków i w konsekwencji uniemożliwieniem zasilania struktur wodonośnych cenomanu przez wody infiltrujące w późniejszym okresie. Wnioski przedstawione w publikacji A.2 stanowią także głos w dyskusji o możliwości występowania wód glacialnych na obszarze środkowej Polski (np. Różański i Zuber, 2000; Nowicki, 1999), co jest związane z możliwością występowania infiltracji w okresie ostatniego zlodowacenia.

4.3 Zastosowanie pomiarów stężeń gazów rozpuszczonych w wodzie podziemnej, danych hydrochemicznych i izotopowych do określenia warunków krążenia i wieku wód podziemnych w Środkowych Sudetach

W obszarze Sudetów Środkowych poziomy wodonośne permu i karbonu charakteryzują się niewielkimi zasobami wód podziemnych i są znacznie słabiej rozpoznane niż poziomy wodonośne występujące w skałach krystalicznych i mezozoicznych skałach osadowych w innych częściach Sudetów. Zastosowanie badań znacznikowych w podwójnym cyklu pobierania próbek podczas zmieniających się warunków dopływu wód podziemnych znacznie ułatwiło rozpoznanie warunków hydrogeologicznych w tym obszarze o skomplikowanej strukturze geologicznej i bardzo złożonych warunkach hydrogeologicznych.

W publikacji A.3 przedstawiono zastosowanie oznaczeń gazów pochodzenia geogenicznego (He, Ne i Ar) i antropogenicznego (CFC-11, CFC-12 i SF₆), danych hydrochemicznych (REEs, U i Th) oraz oznaczeń izotopowych ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i ^3H) w celu określenia warunków krążenia i wieków wód podziemnych w zlewni rzeki Ścinawki, która zajmuje rozległy fragment Sudetów Środkowych. Przeprowadzone badania dotyczą wód podziemnych występujących w strefie aktywnej wymiany, czyli tzw. zwykłych wód podziemnych, charakteryzujących się niewielką mineralizacją (TDS < 1,0 [g·L⁻¹]). Badania zmienności stężeń znaczników środowiskowych jednocześnie migrujących do systemu wodonośnego zarówno z „góry” i z „dołu” pozwalają na bardziej wnikliwe rozpoznanie procesów mieszania się wód o różnej genezie lub różnych drogach dopływu oraz niezależne wyznaczenie wieku tych wód. Pobór próbek był prowadzony dla dwóch grup studni. Pierwsza grupa to studnie wodociągowe eksploatowane w sposób ciągły. Natomiast druga grupa to studnie obserwacyjne, eksploatowane sporadycznie z częstotliwością nie większą niż raz na 5-10 lat. Zróżnicowanie charakteru eksploatacji opróbowanych studzien umożliwiło przeprowadzenie analizy zmienności krążenia wód podziemnych w warunkach naturalnych i warunkach zaburzonych poprzez eksploatację tych wód. Pobór próbek był prowadzony w odstępie ok. pół roku, co miało na celu prześledzenie krótkookresowej zmienności stężeń oznaczanych gazów w wodach podziemnych.

W trakcie całego cyklu badań pobrano 16 próbek wód podziemnych. Próbki pochodziły z systemów wodonośnych: permu (n=10), triasu (n=2) i karbonu (n=4). Analizowany system wodonośny jest zbudowany ze skał okrucowych, głównie piaskowców i zlepieńców. W obrębie tego systemu wyróżniono dwa poziomy wodonośne występujące w strefie aktywnej wymiany wód podziemnych oraz trzeci poziom wodonośny, gdzie występują wody o podwyższonej mineralizacji ($TDS \gg 1,0 \text{ [g}\cdot\text{L}^{-1}]$). Czynnikiem determinującym warunki hydrogeologiczne badanego obszaru jest występowanie uskoku tektonicznych i związanych z nimi stref spękań, gdzie obserwuje się znaczne natężenia dopływów wód podziemnych. Poza strefami uskoku często występują obszary o znikomych zasobach wód podziemnych. Przepływy wód w zależności od przepuszczalności matrycy skalnej mogą mieć zarówno charakter powolnego przesiąkania, jak i przepływu o większej prędkości w strefach uskoku i systemach rozległych szczelin. Pod względem hydrogeologicznym analizowany obszar należy traktować, jako jeden zbiornik wód szczelinowo-porowych o głębokości występowania zwykłych wód podziemnych ($TDS < 1,0 \text{ [g}\cdot\text{L}^{-1}]$) rzędu 110÷450 [m].

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, iż istotne znaczenie ma przepływ wód podziemnych w sieci spękań i szczelin o zbliżonej do pionowej orientacji przestrzennej. Stwarza to warunki do występowania silnej więzi hydraulicznej pomiędzy różnymi partiami systemu wodonośnego położonymi na odmiennych głębokościach. Taki system przepływu powoduje intensywne mieszanie się wód podziemnych, które jest lokalnie intensyfikowane poprzez eksploatację wód podziemnych. Potwierdzają to liczne przypadki występowania wód zawierających jony i/lub gazy w koncentracjach charakterystycznych w badanym obszarze dla głębszych części systemu wodonośnego, przy równoczesnym występowaniu jonów i gazów pochodzenia antropogenicznego.

Obliczenia wieku wód podziemnych prowadzono przy wykorzystaniu pomiarów stężeń He, CFC, SF₆ i aktywności ³H. Obliczony wiek wód podziemnych wskazuje, iż w obszarze badań dominują wody współczesne o wieku poniżej 1000 lat, głównie w zakresie 50÷500 lat (Tab. 6).

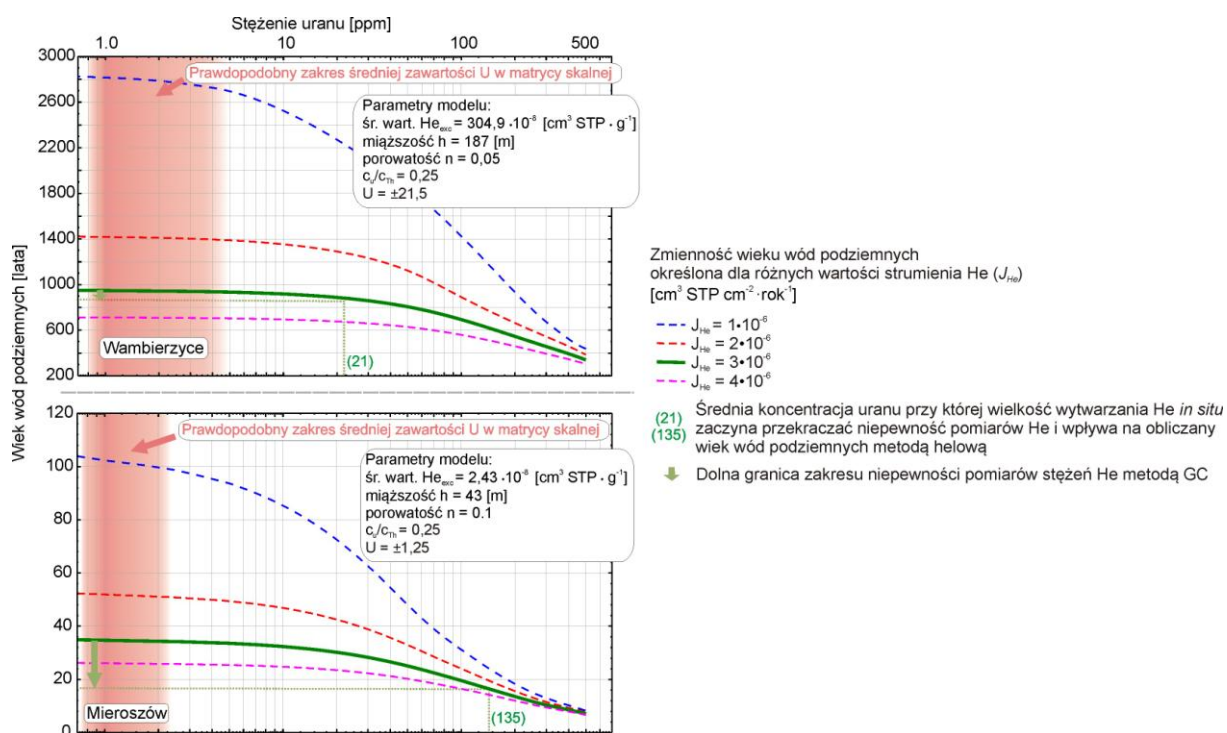
Tabela 6. Wartości NGT, stężenia He, CFC i SF₆ i wiek wód podziemnych obliczony dla oznaczeń wykonanych w dwóch rundach pomiarowych

Studnia	Data	NGT [°C]	He _{exc} [cm ₃ STP·g ⁻¹]	SF ₆ [10 ⁻¹⁵ mol·L ⁻¹]	CFC-12 [10 ⁻¹² g·kg ⁻¹]	CFC-11 [10 ⁻¹² g·kg ⁻¹]	Wiek He [lata]	Wiek SF ₆ [lata]	Wiek CFC-12 [lata]	Wiek CFC-11 [lata]
Unistaw Śl.	23.04.2014	10,6	19,47±1,9	3,0±0,5	119,7±12	196,3±20	52	1,0	42,5	42,5
	04.11.2014	13,5	14,1±1,9	3,18±0,1	124,3±15	220,0±25	37	4,0	41,5	43,0
Mieroszów	23.04.2014	10,4	2,37±1,3	1,91±0,09	106,1±10	196,5±20	33	12,5	41,5	43,0
	04.11.2014	10,0	2,49±1,2	1,9±0,8	113,3±6	208,3±15	35	12,0	41,0	42,5
Golińsk	23.04.2014	7,3	20,64±2,2	6,23±0,65	80,5±6,5	83,3±10	39	n.d.	47,5	51,0
	04.11.2014	7,5	16,7±2,1	5,1±0,55	90,4±8	92,1±10	32	n.d.	46,5	50,0
Czerwieńczyce	24.04.2014	10,4	49,33±4,3	1,82±0,08	71,0±5	122,1±15	202	13,0	45,0	46,0
	05.11.2014	9,2	40,8±4,2	2,38±0,1	82,0±8	143,8±15	167	7,5	44,0	45,0
Świerki	24.04.2014	6,0	38,78±4	0,26±0,06	11,9±1,2	27,8±1,75	212	37,0	60,0	56,0
	05.11.2014	6,9	41,3±4,2	0,28±0,06	12,0±1,5	22,9±1,8	225	36,5	59,5	57,0
Tłumaczów	24.04.2014	5,9	93,64±7	1,46±0,08	13,7±1,5	21,3±1,7	166	20,0	58,5	57,0
	06.11.2014	9,3	103,4±8,0	1,61±0,1	65,0±5	105,7±8	183	17,5	46,0	47,5
Podlesie	25.04.2014	6,4	15,88±1,8	0,18±0,06	19,6±1,7	17,0±1,6	42	39,5	56,0	58,0
	05.11.2014	8,0	13,6±1,8	1,22±0,06	51,0±1,5	65,2±3,5	36	21,0	48,0	50,5
Wambierzyce	25.04.2014	3,1	308,67±22	1,14±0,07	19,3±1,7	33,8±2	951	25,0	57,0	60,0
	06.11.2014	3,3	301,2±21	1,1±0,08	20,8±1,5	42,3±5	928	26,0	57,0	54,5

n.d. - nie oznaczono z wg na występowanie geogenicznego źródła SF₆

Przedstawione wieki wód podziemnych należy traktować, jako przybliżone z uwagi na uwarunkowania hydrogeologiczne obszaru badań i obliczeniowe metod helowej i CFC oraz występowanie geogenicznego źródła SF₆. Istotne znaczenie dla interpretacji wieku w obszarze badań mają także warunki techniczne i/lub konstrukcyjne badanych studni. W dwóch przypadkach występuje rodzaj "uśrednienia" wód podziemnych z połączonych hydraulicznie partii systemu wodonośnego. Wieki wód obliczone za pomocą metody helowej dla płytszych studni (50÷90 [m]) są w dużej części zgodne z wynikami datowania uzyskanymi przy wykorzystaniu pomiarów stężeń CFC i SF₆. Dla głębszych studni (> 90 [m]) wyniki „helowe” są bardziej wiarygodne od wyników uzyskanych metodami CFC i SF₆, szczególnie w kontekście danych hydrogeochemicznych.

Uwzględniając, iż w obszarze badań w skałach matrycy wodonośnej występują podwyższone koncentracje U i Th przeprowadzono indywidualnie dla każdej studni modelowanie wpływu zmienności koncentracji tych pierwiastków na wielkość wytwarzania ⁴He *in situ* (i tym samym na wiek wód) w zależności od różnych wartości J_{He} (zmienna niezależna). Jako najbardziej reprezentatywne przykłady modelowania omówiono przypadki skrajne, czyli studnie, z których pochodzą próbki wód podziemnych o najmniejszych i największych stężeniach He (rys. 1).



Rys. 1. Zmienność wytwarzania ⁴He *in situ* w zależności od stężenia uranu i toru

Uzyskane rezultaty modelowania wpływu zmienności koncentracji U i Th na wielkość wytwarzania ⁴He *in situ* wskazują, iż w obu przedstawionych przypadkach wpływ ten jest właściwie nieistotny. Zbliżone wyniki modelowania zostały uzyskane także dla pozostałych badanych przypadków. Występują oczywiście różnice dotyczące granicznego zakresu stężeń U i Th, przy którym zaznacza się teoretyczny wpływ wytwarzania ⁴He *in situ* na wiek wody, jednakże uwzględniając uwarunkowania geologiczne obszaru badań można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, iż wytwarzanie ⁴He *in situ* nie ma istotnego wpływu na wiek wody. Występowanie warunków geologicznych, w których wielkość wytwarzania ⁴He *in situ* może istotnie wpływać

na datowanie wód podziemnych metoda helową jest bardzo mało prawdopodobne w świetle dotychczas wykonanego rozpoznania obszaru badań pod kątem poszukiwania złóż uranu. W publikacji A.3 przeprowadzono także rozpoznanie warunków migracji mobilnych jonów uranu i zawiesiny związków toru w wodzie podziemnej oraz wpływu tych pierwiastków na wielkość wytwarzania ^4He *in situ*. Pomimo, iż obszar Sudetów Środkowych charakteryzuje się podwyższonymi stężeniami U i Th w skałach (w odniesieniu do obszaru środkowej Europy) to wyższe stężenia tych pierwiastków występują w wodach podziemnych jedynie lokalnie ($c_U = 71 \text{ [mg}\cdot\text{L}^{-1}]$ i $c_{Th} = 26 \text{ [mg}\cdot\text{L}^{-1}]$). Najprawdopodobniej, istotnym czynnikiem warunkującym stężenia związków U i Th w strefie aktywnej wymiany w obszarze badań są nie tylko warunki geochemiczne środowiska (między innymi pH, Eh i TOC), które są dosyć zbliżone, lecz przede wszystkim możliwość napływu wód z głębszych poziomów wodonośnych i/lub kontaktu ze skałami o wysokiej zawartości uranu. Biorąc pod uwagę charakter przepływu wód podziemnych, który odbywa się przede wszystkim w sieci czynnych hydraulicznie szczelin oraz średnie parametry fizyczne matrycy wodonośnej (porowatość i szczelinowatość) stwierdzono, iż związki U i Th występujące w wodach podziemnych zarówno w formie jonowej, jak i zawiesiny nie mają (w większej skali przestrzennej) istotnego wpływu na wytwarzanie ^4He *in situ*.

Moim zdaniem, wyniki uzyskane w publikacji A.3 mogą być zaliczone do wkładu w rozwój dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska ze względu na ustalenie, iż dla większości współczesnych wód podziemnych ilość wytwarzanego ^4He *in situ* jest nieistotna w kontekście badań warunków krążenia i wyznaczania wieku wód podziemnych metodą helową wykorzystując oznaczenia chromatograficzne. Przeprowadzone modelowanie wpływu zmienności koncentracji U i Th na wielkość wytwarzania ^4He *in situ* ma w dużym stopniu charakter uniwersalny, ponieważ została wykonana dla obszaru o podwyższonych stężeniach U i Th w skałach matrycy wodonośnej oraz bezpośrednio w wodzie podziemnej. Na obszarach występowania skał o mniejszych koncentracjach tych pierwiastków ilość ^4He wytwarzanego *in situ* będzie jeszcze mniejsza. Uzyskane wyniki mogą, zatem zostać odniesione do większości wód podziemnych, dla których stężenia He wynoszą $10^{-6} \div 10^{-8} \text{ [cm}^3 \text{ STP}\cdot\text{g}^{-1}]$. Są to zazwyczaj wody występujące w strefie aktywnej wymiany i bardzo często wykorzystywane, jako podstawowe źródło wody do picia i/lub na potrzeby produkcyjne.

W publikacji A.3 stwierdzono także, iż w obszarze badań nie występuje dyfuzyjne rozpraszanie strumienia J_{He} migrującego z głębokiego podłoża, lecz dopływ He ma charakter mozaikowy, związany głównie z systemami szczelin i uskoków. Obraz zmienności stężeń He pomimo zróżnicowana przestrzennego i krótkiego okresu obserwacji wskazuje na stabilny dopływ He z głębszych partii górotworu.

Zauważono również, iż istotny wpływ na wartość NGT mają nawet niewielkie fluktuacje stężeń Ne i Ar, które mieszczą się w zakresie niepewności pomiaru lub nieznacznie ją przekraczają. Dlatego też oznaczenia NGT w obszarze badań wymagają ostrożności w interpretacji i mogą być obciążone trudną do oszacowania niepewnością, szczególnie podczas jednorazowych pomiarów.

Badania prowadzone zarówno w warunkach naturalnego przepływu, jak i przepływu zaburzonego poprzez ciągłą eksploatację umożliwiły bezpośrednie określenie zakresu maksymalnej szybkości degradacji CFC-11 i CFC-12

na głębokościach w zakresie 50÷500 [m] w obrębie skał okruchowych. Zakres ten wynosi 189÷315 [g·L⁻¹·rok⁻¹] dla CFC-11 i 110÷198 [g·L⁻¹·rok⁻¹] dla CFC-12.

Wyniki uzyskane w publikacji A.3 mają znaczenie także w skali lokalnej, tj. obszaru Sudetów Środkowych, ponieważ wskazują na znaczny udział wód współczesnych w całej strefie aktywnej wymiany wód podziemnych. Jest to rezultatem występowania silnej więzi hydraulicznej i w konsekwencji mieszania się wód pochodzących z różnych części systemu wodonośnego. Rezultaty badań wskazują, iż w analizowanym obszarze przepływ wód o kierunkach zbliżonych do pionowych może mieć znaczenie porównywalne z przepływem lateralnym. Jest to istotne z punktu ochrony tych wód przed zanieczyszczeniami przesiąkającymi z powierzchni terenu, ponieważ badany system wodonośny pozbawiony jest warstwy izolującej. Należy podkreślić, iż lokalnie już obecnie zaznacza się dopływ wód zanieczyszczonych antropogenicznie. Przejawia się to głównie podwyższonymi stężeniami jonów NO₃⁻ (rzędu 7÷20 [mg·L⁻¹]) występującymi w użytkowych, głębszych częściach systemu wodonośnego.

5. WSKAZANIE NAJWAŻNIEJSZYCH OSIĄGNIĘĆ CYKLU PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Wyniki cyklu publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego, które uważam za znaczące z punktu widzenia ochrony i kształtowania środowiska, są następujące:

- 1) Określenie warunków krążenia i wyznaczenie wieku wód podziemnych występujących w różnych typach ośrodków wodonośnych za pomocą zróżnicowanych metod badawczych: metody helowej, radiowęglowej, oznaczeń gazów geogenicznych (He, Ne i Ar), antropogenicznych (CFC-11, CFC-12 i SF₆) oraz aktywności ³H;
- 2) Wykazanie, iż zawartość U i Th w matrycy skalnej warstwy wodonośnej, a także ich związków w wodzie podziemnej nie ma istotnego wpływu na wielkość wytwarzania ⁴He *in situ*;
- 3) Określenie warunków występowania i migracji gazów rozpuszczonych w wodzie (He, Ne, Ar, SF₆, CFC-11 i CFC-12) w złożonych warunkach przepływu w zróżnicowanych ośrodkach wodonośnych;
- 4) Opracowanie koncepcji oceny niepewności datowania wód podziemnych metodą helową przy uwzględnieniu głównych parametrów obliczeniowych;
- 5) Ocena możliwości wystąpienia zasilania wód siarczkowych występujących w rejonie niecki miechowskiej podczas zlodowacenia Wisły.

6. MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE UZYSKANYCH WYNIKÓW

Wyniki uzyskane w publikacjach stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego mają znaczenie praktyczne ze względu na:

- 1) Rezultaty modelowania wpływu zmienności koncentracji U i Th na wielkość wytwarzania ⁴He *in situ* (P_{He}) wskazują, iż można uprościć obliczenia wieku wód podziemnych przy wykorzystaniu metody helowej.

Wynika to z faktu, iż do obliczeń wieku w oparciu o oznaczenia chromatograficzne nie będzie potrzebna znajomość koncentracji U i Th w matrycy skalnej warstwy wodonośnej. Dlatego też zmienna P_{He} wykorzystywana w obliczeniach wieku wód podziemnych może zostać pominięta, co dla większości współczesnych wód podziemnych upraszcza obliczenia przy zachowaniu odpowiedniej dokładności wyznaczania wieku podziemnych;

- 2) Uzyskane rezultaty wskazują, iż metoda helowa może być z powodzeniem stosowana do określania wieku wód podziemnych w obszarach o podwyższonych koncentracjach U i Th w skałach (w zakresie porównywalnym do Sudetów Środkowych) i wyniki te mogą być w pełni porównywalne z wynikami uzyskanymi dla rejonów o zbliżonym lub niższych zawartościach tych pierwiastków;
- 3) Jednoczesne pomiary stężeń CFC-11, CFC-12, SF_6 i gazów szlachetnych wykonane w dwóch turach pomiarowych w zmiennych warunkach napływu wnoszą istotne informacje dotyczące systemu krążenia wód nawet, jako surowe dane - niezależnie od wykorzystania ich do określenia wieku wód i innych parametrów hydrogeologicznych. Ponieważ badania takie są relatywnie tanie w porównaniu do oznaczeń uzyskanych przy wykorzystaniu techniki spektrometrii masowej stwarza to możliwość szerszego zastosowania tych oznaczeń w badaniach hydrogeologicznych;
- 4) Obliczony zakres degradacji CFC może zostać wykorzystany w celu uwzględnienia odpowiednich poprawek korekcyjnych przy datowaniu wód podziemnych przy wykorzystaniu metody CFC, szczególnie w przypadku głębszych poziomów wodonośnych w szczelinowo-porowych systemach wodonośnych. Występowanie degradacji CFC w znaczący sposób może utrudniać zastosowanie CFC do datowania wód podziemnych, jeżeli nie jest znana szybkość degradacji tych związków;
- 5) Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zróżnicowania koncepcji ochrony wód podziemnych w badanych obszarach. Dotyczy to między innymi problematyki ustalania stref ochronnych, czy analizy ryzyka zanieczyszczenia wód dla poszczególnych ujęć wód podziemnych. Biorąc pod uwagę rezultaty badań wydaje się istotne zwiększenie stopnia ochrony i wprowadzenie monitoringu w obszarach stref tektonicznych, gdzie są zlokalizowane ujęcia (Sudety Środkowe) oraz objęcie monitoringiem rejonów występowania słabszej izolacji użytkowych poziomów wodonośnych (a także stref zasilania tych poziomów) i prowadzenie racjonalnej eksploatacji wód podziemnych w strefach możliwej ascencji wód z głębszego podłoża (zlewnia Gwdy).

7. POZOSTAŁE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE

7.1 Uzupelniająca działalność naukowa związana z badaniami gazów rozpuszczonych w wodach podziemnych

W trakcie prowadzenia działalności naukowej dotyczącej wykorzystania w badaniach hydrogeologicznych oznaczeń zawartości gazów rozpuszczonych w wodach podziemnych (rozdział 4) powstały także prace uzupełniające w odniesieniu do cyklu publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego. Są to dwie publikacje (B.12 i B. 13) oraz raport techniczny Instytutu Fizyki Jądrowej w Krakowie (D.1).

Publikacja B.12 stanowi uzupełnienie zagadnień dotyczących badania zmienności stężeń He w obrębie poziomów kenozoicznych zlewni Gwdy pierwotnie prezentowanych w publikacji A.1 i przedstawia rozszerzenie tych informacji o analizę możliwych błędów związanych z doбором parametrów obliczeniowych i interpretacji wyników dla niewielkich stężeń He nieznacznie przekraczających niepewność pomiaru.

W publikacji B.13 i raporcie D.1 zaprezentowano chromatograficzną metodę jednoczesnego pomiaru stężenia chloro- i fluoropochodnych węglowodorów alifatycznych (CFC-11, CFC-12), sześciopochodku siarki (SF_6) oraz gazów szlachetnych (He, Ne i Ar) w wodach podziemnych. Pomiary wykonywane są w zbudowanym i zmodyfikowanym w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie stanowisku pomiarowym. Jednocześnie opracowana została technika poboru próbek wody podziemnej bez kontaktu z powietrzem atmosferycznym i procedura pomiaru umożliwiająca symultaniczny pomiar stężeń wszystkich wyżej wymienionych gazów z jednej próbki wody. Układ pomiarowy składa się z dwóch chromatografów i trzech torów pomiarowych wyposażonych w detektory ECD i TCD. Uzyskane poziomy wykrywalności LOD dla poszczególnych gazów w próbce wody o objętości $2,9 \text{ dm}^3$ wynoszą: $1,9 \cdot 10^{-8} [\text{cm}^3 \text{ STP} \cdot \text{cm}^{-3}]$ dla Ne, $3,1 \cdot 10^{-6} [\text{cm}^3 \text{ STP} \cdot \text{cm}^{-3}]$ dla Ar, $14 \cdot 10^{-8} [\text{cm}^3 \text{ STP} \cdot \text{cm}^{-3}]$ dla He w układzie bez wzbogacania próbki oraz $1,2 \cdot 10^{-8} [\text{cm}^3 \text{ STP} \cdot \text{cm}^{-3}]$ dla He w układzie z kriogenicznym wzbogacaniem próbki oraz $0,06 [\text{fmol} \cdot \text{L}^{-1}]$ dla SF_6 , $15 [\text{fmol} \cdot \text{L}^{-1}]$ dla CFC-11 i $10 [\text{fmol} \cdot \text{L}^{-1}]$ dla CFC-12. Wykrywalność He w układzie chromatograficznym z systemem kriogenicznego wzbogacania próbki jest wystarczająca do pomiarów He w bardzo młodych wodach (rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu lat). Opracowany układ oznaczania Ar i Ne w wodzie pozwala na określenie temperatury zasilania wód podziemnych (NGT) i ilości „nadmiaru powietrza” w wodzie z niepewnościami wynoszącymi odpowiednio: $1,2 [^\circ\text{C}]$ i $0,7 [\text{cm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}]$.

W publikacji B.13 i raporcie D.1 przedstawiono także prezentację testu porównawczego metodyki poboru i oznaczeń stężeń gazów rozpuszczonych w wodzie podziemnej zorganizowanego przez Université Paris-Sud i Université Rennes w ramach projektu badawczego GDAT 2012. Celem projektu był pobór próbek wód podziemnych ze studzien ujęcia Saint Lambert (Francja) i oznaczenie stężeń wybranych gazów (CFC-11, CFC-12, SF_6 , He, Ne i Ar) wykonanych niezależnie przez 31 laboratoriów z 14 krajów świata. Uzyskane przez IFJ PAN wyniki pomiarów były zgodne, co do rzędu wielkości błędu pomiaru stężeń (odpowiedniego dla poszczególnych gazów) z wynikami pomiarów wykonanymi innymi metodami (spektrometria mas) stosowanymi w laboratoriach na świecie. Oznacza to, iż wyniki oznaczeń stężeń gazów rozpuszczonych w wodzie podziemnej uzyskane przy zastosowaniu metody chromatografii gazowej są w pełni porównywalne z wynikami uzyskanymi przez inne laboratoria i mogą być wykorzystane w większości badań hydrogeologicznych. Nie dotyczy to natomiast badań genezy He, gdzie konieczna jest znajomość wartości $^3\text{He}/^4\text{He}$.

7.2 Główne zagadnienia pozostałego dorobku naukowo-badawczego

7.2.1 Krótki opis publikacji stanowiących pozostały dorobek naukowo-badawczy

Poza zagadnieniami przedstawionymi w rozdziale 4 moja aktywność naukowa obejmuje zagadnienia dotyczące ochrony i kształtowania środowiska, przede wszystkim z zakresu chemizmu wód podziemnych w wielu aspektach. Analizowane problemy dotyczyły przede wszystkim identyfikacji procesów kształtowania się składu chemicznego wód podziemnych. Prowadzone przeze mnie badania były realizowane w obrębie różnowiekowych ośrodków wodonośnych o zróżnicowanych warunkach przepływu (systemy porowe, szczelinowo-porowe

i szczelinowe) i dotyczyły zarówno zwykłych wód podziemnych, jak i wód o podwyższonej mineralizacji, w tym wód leczniczych. Istotną część prowadzonych badań dotyczyła określenia genezy wód podziemnych i/lub pochodzenia substancji rozpuszczonych w wodzie przy wykorzystaniu oznaczeń izotopowych i badań mikrobiologicznych. Prowadziłem także prace badawcze dotyczące wpływu eksploatacji wód podziemnych w złożonych warunkach hydrodynamicznych na skład chemiczny ujmowanych wód. Pozostałe tematy badawcze były między innymi związane z analizą struktury eksploatacji wód podziemnych, czy wykorzystaniem wód termalnych w obszarach niezwiązanych z energetyką geotermalną. Pozostałe, poza hydrogeologiczne aspekty mojej pracy naukowej dotyczą głównie badań wpływu zmian głębokości zwierciadła płytkich wód podziemnych na rozwój osiadań budowli różnego typu.

7.2.2 Rozpoznawanie i opis procesów kształtowania się chemizmu wód podziemnych

Jednym z głównych zagadnień badawczych poruszanych w publikacjach B.10 i B.30 było określenie procesów kształtujących skład chemiczny wód podziemnych w obszarze zlewni Gwdy. Badania te są rozwinięciem i kontynuacją prac badawczych prowadzonych w tym obszarze przed doktoratem (C.2 i C.3). W strefie aktywnej wymiany wód występuje tam system wodonośny wykształcony w detrytycznych osadach miocenu i plejstocenu. W obszarze zlewni Gwdy różnowiekowe poziomy wodonośne występują lokalnie w bezpośredniej łączności hydraulicznej, głównie w rejonach erozyjnych struktur kopalnych lub strefach zaburzeń galcitektonicznych. Do rozwiązania problemów badawczych wykorzystano wyniki analiz fizyko-chemicznych wód podziemnych obejmujące oznaczenia 28 parametrów. Bazę danych stanowiły wyniki analiz wykonanych dla wód głębszych poziomów wodonośnych (n=101) i wód płytszych poziomów (n=218). Jako metody interpretacji wykorzystano wielowymiarowe techniki statystyczne takie jak hierarchiczna analiza skupień i analiza czynnikowa obejmująca metodę składowych głównych. Przeprowadzono analizę geostatystyczną, wykorzystując metodę krigingu punktowego i modelowanie semiwariogramów dla wybranych składników wód podziemnych. W ramach badań określono także tło hydrogeochemiczne dla wybranych struktur wodonośnych reprezentujących różne strefy hydrogeochemiczne.

Rezultaty badań wskazują, iż skład chemiczny wód podziemnych w strefie aktywnej wymiany w obszarze zlewni Gwdy jest relatywnie mało zróżnicowany, szczególnie w kontekście dużej wielkości obszaru badawczego. Uzyskane wyniki wskazują, iż zasadniczy etap rozpuszczania głównych minerałów skałotwórczych (węglanów, krzemianów i glinokrzemianów) ma miejsce podczas infiltracji i przesiąkania wód do płytkich poziomów wodonośnych i skład chemiczny wód podziemnych nie ulega już później zasadniczym modyfikacjom. Oczywiście jest zauważalna pewna zmienność stężeń głównych jonów podczas przepływu wód podziemnych od strefy zasilania do strefy drenażu (B.10), lecz nie zmienia to ogólnej konstatacji. To relatywnie małe zróżnicowanie składu chemicznego wód podziemnych ma związek z silną więzią hydrauliczną występującą w obszarze badań, co zostało potwierdzone także wynikami badań gazów rozpuszczonych w wodzie (A.1). Największe zróżnicowanie składu chemicznego wód podziemnych dotyczy płytkich poziomów plejstocenu i jest warunkowane dopływem zanieczyszczeń antropogenicznych. Analiza zmienności stężeń głównych jonów w płytkich poziomach wodonośnych w odniesieniu do teoretycznych linii rozpuszczania węglanów wskazuje, że lokalnie procesy intensyfikujące rozpuszczanie węglanów mogą nawet dominować w kształtowaniu chemizmu

wód tych poziomów. Lokalnie skład chemiczny wód podziemnych głębszych poziomów jest także modyfikowany w wyniku występowania procesów wymiany jonowej, czy ascenzji wód z poziomów mezozoicznych.

Rozpoznanie procesów kształtujących skład chemiczny i/lub stężenia wybranych jonów w wodach podziemnych obszaru Małopolski było przedmiotem publikacji B.8 i B.17. W analizowanym obszarze ośrodki wodonośne występują w osadach kenozoicznych, mezozoicznych i paleozoicznych. Badania prowadzono w oparciu o wydzielone środowiska hydrogeologiczne: A porowe, B szczelinowo-porowe (flisz) i C szczelinowo-krasowe. Kryteriami wydzielenia tych środowisk była zmienność litologii i geometrii pustek skalnych w ośrodkach wodonośnych. Bazę danych tworzył zbiór 581 wyników analiz fizyko-chemicznych obejmujących oznaczenia 10 parametrów. Jako metody badawcze zastosowano hierarchiczną analizę skupień, analizę czynnikową oraz nieparametryczne testy ANOVA.

W publikacji B.8 zostały określone zakresy tła hydrogeochemicznego jonów Na^+ i K^+ dla poszczególnych środowisk hydrogeologicznych (A÷C), które nie odbiegają znacząco od zakresów tła określonych w innych obszarach Polski. Stwierdzono występowanie anomalnych stężeń tych jonów we wszystkich środowiskach hydrogeologicznych. Anomalnym stężeniom Na^+ i K^+ często towarzyszą wyraźnie podwyższone stężenia jonów Cl^- i SO_4^{2-} . Zróżnicowanie zmienności stężeń jonów Na^+ i K^+ występuje pomiędzy środowiskami A i C, i nie jest obserwowane dla środowiska B. Jako czynniki odpowiedzialne za to zróżnicowanie wskazano zmienność litologiczną i odmienne systemy krążenia wód podziemnych.

W publikacji B.17 zwrócono uwagę na istotny wpływ zmienności środowiska hydrogeochemicznego na kształtowanie stężeń jonów HCO_3^- i częściowo także jonów NO_3^- oraz wartości pH. Jako jeden z głównych czynników kształtujących stężenia jonów Ca^{2+} i Mg^{2+} wskazano dopływ wód o wysokich stężeniach jonów SO_4^{2-} . Dopływ takich wód może powodować zaburzenie równowagi siarczanowej i intensyfikację rozpuszczania minerałów węglanowych. Innym źródłem wysokich stężeń jonów Ca^{2+} i SO_4^{2-} może być ascenzja, rozpuszczanie gipsu lub dopływ wód znacznie przekształconych antropogenicznie.

Kolejnym przykładem pracy poruszającej problematykę kształtowania się składu chemicznego wód podziemnych jest publikacja B.3. Obszar badawczy tej pracy został zlokalizowany w obrębie zlewni Ścinawki w Sudetach Środkowych. Badania zostały przeprowadzone w obrębie szczelinowo-porowego systemu wodonośnego, który występuje głównie w skałach detrytycznych permu i karbonu. Szerszy opis warunków hydrogeologicznych przedstawiono w rozdziale 4. W pracy B.3 przedstawiono analizę zróżnicowania chemizmu pomiędzy źródłami i wodami podziemnymi występującymi na większych głębokościach (ujmowanymi studniami wierconymi). Analiza ta miała na celu określenie jednorodności badanego systemu wodonośnego pod względem składu chemicznego. Jest to istotne z uwagi na ochronę wód podziemnych, ponieważ w płytszych partiach systemu wodonośnego obserwowane są wyraźnie podwyższone stężenia jonów pochodzenia antropogenicznego, a wody podziemne stanowią bardzo często jedyne źródło zaopatrzenia w wodę w tym terenie. Do rozwiązania problemów badawczych wykorzystano 70 wyników analiz fizyko-chemicznych wód podziemnych obejmujących 13 parametrów. Jako metody interpretacji danych zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji i następnie analizę czynnikową. Adekwatność zastosowania parametrycznej analizy wariancji potwierdzono testami

sprawdzającymi normalność rozkładu oraz jednorodność wariancji analizowanych danych (testy Hartleya, Bartletta i Cochra).

Uzyskane rezultaty wskazują na brak istotnego zróżnicowania zmienności stężeń większości analizowanych jonów w zależności od głębokości ujętego poziomu wodonośnego. Wyraźniejsze różnice pomiędzy chemizmem wód płytkich i głębokich części systemu wodonośnego dotyczą stężeń jonów Na^+ , NO_3^- oraz wartości pH, co jest warunkowane lokalnymi procesami geochemicznymi. W głębszych partiach systemu wodonośnego zauważalne są wyższe stężenia głównych jonów, jednakże średnie różnice pomiędzy stężeniami w wodach występującymi płytko i głęboko zazwyczaj nie przekraczają 20 %. System wodonośny jest w znacznej mierze jednorodny pod względem chemizmu wód podziemnych, co wskazuje na występowanie silnej więzi hydraulicznej pomiędzy różnymi partiami systemu wodonośnego i zostało potwierdzone badaniami stężeń gazów rozpuszczonych w wodach podziemnych (A.3).

W ramach aktywności naukowej prowadziłem także badania przedstawiające zmienność składu chemicznego wód podziemnych w wybranych ujęciach/obszarach oraz dotyczące poszczególnych składników wód podziemnych. Wyniki tych prac są prezentowane w publikacjach przeglądowych (B.14, B.15, B.18, B.22 i B.25), które przedstawiają przydatne w praktyce informacje o zróżnicowaniu w skali lokalnej/regionalnej wybranych parametrów istotnych w kontekście uzdatniania wód podziemnych. W dwóch przypadkach prowadzone badania dotyczyły składu chemicznego wód powierzchniowych (B.16) i prowadzone były w ramach współpracy zagranicznej (B.1). W publikacji B.16 przedstawiono analizę zanieczyszczenia środowiska zbiorników wodnych w regionie Osielska. W ramach przeprowadzonych prac pobrano próbki wody i osadu dennego z pięciu jezior. Występują tam głównie lekko zasadowe wody o przewodności elektrolitycznej do $1025 \text{ } [\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$. Rezultaty wykonanych badań (przy wykorzystaniu ASS i ICP-MS) wskazują na niskie wartości stężeń pierwiastków podrzędnych i śladowych zarówno w wodzie, jak i osadach jeziornych. Jednocześnie stwierdzono występowanie korelacji między wielkością i położeniem jeziora a stężeniem zanieczyszczeń.

Jednym z zagadnień, które wielokrotnie pojawiło się podczas badań nad kształtowaniem się chemizmu wód podziemnych był problem oceny poprawności rezultatów uzyskiwanych metodami wnioskowania statystycznego (B.24). W tej publikacji przeprowadzono wnioskowanie statystyczne przy wykorzystaniu popularnych technik statystycznych dla danych pochodzących z dobrze rozpoznanego obszaru zlewni Gwdy, gdzie wykonano szereg dodatkowych oznaczeń izotopowych ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$ i ^3H) i badań mikrobiologicznych. Bazę danych tworzył zbiór 101 wyników analiz fizyko-chemicznych wód podziemnych obejmujących oznaczenia 28 parametrów. Wykorzystanie wszystkich wyżej wymienionych danych pozwoliło na przeprowadzenie analizy porównującej wybrane metody statystyczne. Do testów wybrano często wykorzystywane metody statystyczne: hierarchiczną analizę skupień (HCA), analizę składowych głównych (PCA) i analizę czynnikową (FA). Wszystkie metody zostały zastosowane w celu identyfikacji procesów formowania składu chemicznego wód poziomów mioceńskiego i głębokiego plejstoceniowego, tworzących głęboką, hydrodynamicznie spójną strukturę wodonośną. Uzyskane rezultaty wskazują, iż wszystkie testowane metody okazały się wrażliwe na występowanie anomalii hydrogeochemicznych. Z tego względu, w przypadku analizy skupień i analizy składowych głównych, niemożliwe było dokonanie w pełni poprawnego opisu chemizmu wód podziemnych w obszarze badań. Najlepsze rezultaty

osiągnięto przy zastosowaniu analizy czynnikowej, ale i ta metoda jest wrażliwa na występowanie przypadków odstających (anomali). Jednakże pominięcie takich wyników zniekształciłoby naturalny i charakterystyczny obraz zmienności składu chemicznego wód podziemnych w obszarze badań. Zastosowane metody statystyczne okazały się pomocne, jednakże interpretacja uzyskanych rezultatów, szczególnie dla zróżnicowanych danych, jest utrudniona i powinna być uzupełniona o wyniki niezależnych badań, np. izotopowych.

7.2.3 Analiza genezy i wieku wód podziemnych na podstawie oznaczeń izotopowych

Występujące w obszarze zlewni Gwdy głębokie poziomy wodonośne stanowią część zasobnego systemu wód podziemnych o dobrej jakości, o zasięgu znacznie przekraczającym obszar rozpatrywanej zlewni. Wody podziemne występujące w obrębie tego systemu są w licznych miejscowościach podstawowym i jedynym źródłem wody do picia. Obszar zlewni Gwdy jest intensywnie użytkowany rolniczo i ponad 30% płytkich poziomów wodonośnych w granicach tej zlewni jest w różny sposób zanieczyszczona antropogenicznie. Dlatego też istotnego znaczenia nabiera rozpoznanie warunków hydrodynamicznych, a w szczególności przesiąkania pomiędzy różnymi poziomami wodonośnymi, co przedstawiono w publikacjach B.6 i B.28. W wyżej wymienionych pracach zaprezentowano zastosowanie oznaczeń izotopowych ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{13}\text{C}$), aktywności ^3H i ^{14}C oraz danych hydrogeochemicznych do określenia warunków krążenia i wieku wód podziemnych. Dodatkowo w publikacji B.28 w celu zobrazowania zlewniowego systemu krążenia wód podziemnych oraz oszacowania czasu przebywania wód w systemie wodonośnym wykonano 2-wymiarowe modele hydrodynamiczne wykorzystując metodę elementów skończonych.

Uzyskane rezultaty badań izotopowych wskazują, iż wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ są zbliżone zarówno dla głębokich, jak i płytszych poziomów wodonośnych, co wskazuje na znaczne natężenie pionowej składowej przepływu zarówno w strefie zasilania, jak i w obszarze tranzytowym (wysoczyzny). Spostrzeżenie to potwierdzają wyniki badań modelowych i analiza wskaźników hydrochemicznych $r(\text{Cl}/\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ i $r(\text{Na}/\text{Na}+\text{Ca})$. Rozpatrując wspólnie wszystkie uzyskane rezultaty widoczne jest występowanie silnej więzi hydraulicznej pomiędzy płytkimi i głębokimi poziomami wodonośnymi, co wskazuje na potencjalną możliwość migracji zanieczyszczeń z poziomów płytszych. Na podstawie uzyskanych wyników można także stwierdzić, że wody pochodzące z głębokich poziomów wodonośnych są w większości przypadków zbliżone od wód współczesnych pod względem składu izotopowego. Natomiast ich wiek można określić na ok. 2500 lat biorąc pod uwagę całkowity czas przebywania wód w systemie wodonośnym.

7.2.4 Określenie źródła pochodzenia wybranych składników wód podziemnych

Głównym zagadnieniem badawczym w publikacjach B.27 i B.29 było określenie genezy jonów SO_4^{2-} i oddziaływania redukcji bakteryjnej na kształtowanie stężeń tych jonów w wodach podziemnych w obszarze głębokiej doliny kopalnej w rejonie Wysokiej (Pojezierze Krajeńskie). Wyniki badań przedstawione w tych publikacjach są rozwinięciem i kontynuacją prac nad kształtowaniem się składu chemicznego i izotopowego wód podziemnych prowadzonych w tym terenie przed doktoratem (C.1). W obszarze badań stwierdzono występowanie w latach 1970-2007 dynamicznego wzrostu stężeń jonów SO_4^{2-} i Cl^- w wodach głębokiego poziomu plejstocenijskiego oraz wyraźne zmiany innych parametrów hydrogeochemicznych. Z uwagi na fakt, iż w obszarze badań zlokalizowane są trzy duże ujęcia wód podziemnych zaopatrujące wspólnie kilkanaście

tysięcy indywidualnych odbiorców, istotnym zagadnieniem było określenie źródła pochodzenia tych jonów oraz dynamiki zmian ich stężeń. Specyficzne uwarunkowania hydrogeologiczne umożliwiły przeprowadzenie analizy zmian składu chemicznego wód podziemnych na drodze ich przepływu przez erozyjną strukturę kopalną, która stanowi potencjalny „łącznik hydrauliczny” pomiędzy różnymi poziomami wodonośnymi.

W ramach badań laboratoryjnych wykonano analizy fizyko-chemiczne, izotopowe ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$) oraz oznaczenia aktywności ^3H . Na podstawie badań aktywności ^3H stwierdzono brak istotnego dopływu wód z płytszych poziomów, które są znacznie zanieczyszczone antropogenicznie i zawierają między innymi podwyższone stężenia jonów SO_4^{2-} . Uzyskane wyniki oznaczeń $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4^{2-})$ i $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ wskazują, iż jony SO_4^{2-} powstają i/lub powstawały w głębokich poziomach wodonośnych głównie w wyniku utleniania pirytu przy udziale bakterii *Thiobacillus denitrificans*. Hipotezę o utlenianiu pirytu potwierdza obserwowany wzrost zawartości jonów Ca^{2+} (buforowanie przez kalcyt reakcji utleniania pirytu) oraz podwyższona zawartość jonów Fe_{og} , która dwukrotnie przekracza wartości obserwowane dla głębokiego poziomu plejstoceniowego w obszarze badań. W oparciu o zależność Rayleigha i rezultaty oznaczeń składu izotopowego jonów SO_4^{2-} stwierdzono, iż procesy redukcji siarczanów przebiegały ze znacznie zróżnicowaną intensywnością i w wyniku redukcji bakteryjnej zostało usunięte od 30% do ponad 50% pierwotnej zawartości jonów SO_4^{2-} w poszczególnych przypadkach.

7.2.5 Analiza wpływu eksploatacji wód podziemnych na ich skład chemiczny

Następnym problemem badawczym, który podejmowałem w ramach swojej aktywności naukowej jest zagadnienie wpływu eksploatacji wód podziemnych na zmiany ich składu chemicznego. Jako czynniki wpływające na skład chemiczny ujmowanych wód brano pod uwagę zarówno zmienność natężenia eksploatacji, jak i czas trwania tej eksploatacji. Przeprowadzone badania dotyczyły zarówno zwykłych wód podziemnych (B.19), jak i wód mineralnych posiadających status wód leczniczych (B.4 i B.11). Analizowane ujęcia wód mineralnych znajdują się w obszarze doliny Popradu i są zafiltrowane w obrębie piaskowców fliszowych. Skąty fliszowe w obszarze badań są środowiskiem występowania zarówno wód mineralnych, jak i zwykłych. Zasadniczą rolę w procesie formowania składu chemicznego wód mineralnych odgrywa gazowy CO_2 pochodzenia głębinowego. Wody lecznicze powstają najczęściej poprzez mieszanie się w różnych proporcjach wód głębszego, regionalnego systemu przepływu z wodami płytszego systemu krążenia wód podziemnych.

W publikacji B.11 przedstawiono analizę zmienności następujących parametrów: wydajności (Q), głębokości zwierciadła wody (depresji), przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW), stężenia jonów HCO_3^- i zawartości gazowego CO_2 . Wszystkie te parametry były obserwowane w okresie 2004-2011 w wodach podziemnych ujęcia Antoni. Analizowany zbiór danych obejmuje 390 przypadków. Jako metodę badawczą zastosowano analizę zmienności czasowej oraz ocenę wzajemnej korelacji przy poziomie istotności $p < 0,001$ (test dwustronny).

Największe zróżnicowanie czasowe i liczne występowanie wartości odstających charakteryzuje Q i częściowo także PEW, natomiast pozostałe parametry cechuje znacznie mniejsze zróżnicowanie. Do rozkładu czasowego zmienności stężeń jonów HCO_3^- dopasowano wielomianową funkcję trendu (trzeciego stopnia) z wysokim współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,81$. Rezultaty analizy korelacji wskazują, iż występuje zauważalny spadek stężenia jonów HCO_3^- w reakcji na obniżenie wielkości eksploatacji wód leczniczych. Biorąc pod uwagę stabilność dopływu CO_2 najprawdopodobniej wskazuje to na możliwość lokalnego przesiąkania w strefie przyotworowej

wód o mniejszym stężeniu jonów HCO_3^- z wyżej położonych partii systemu wodonośnego. Udział tych wód jest niewielki w odniesieniu do wielkości dopływu wód z głębszych części systemu wodonośnego i w czasie regularnej eksploatacji o większej wydajności zawartość jonów HCO_3^- powraca do wartości charakterystycznych dla głębszej partii systemu wodonośnego. Korzystna, zatem jest ciągła eksploatacja ujęcia z odpowiednią, stałą wydajnością, co powinno zapewnić stabilność składu chemicznego eksploatowanych wód leczniczych.

Odmienny i nietypowy przypadek wpływu eksploatacji wód podziemnych na chemizm ujmowanych wód jest obserwowany na ujęciu Zubrzyk (B.4). Występuje tam współdziałanie studni eksploatujących wody lecznicze (Z-2 i Z-3a) będące rezultatem częściowego nakładania się zasięgów leja depresji obu studni. W celu stwierdzenia, czy wspólna eksploatacja studni nie powoduje zmian składu chemicznego ujmowanych wód, wykonano analizę zmienności wydajności chwilowej (Q), głębokości zwierciadła wody (depresji), przewodności elektrolitycznej właściwej (PEW) i zawartości gazowego CO_2 . Bazę danych stanowiły obserwacje z okresu 2011-2016 obejmujące 392 oznaczeń dla studni Z-2 (n=196) i studni Z-3a (n=196). Jako metody rozpoznania współzależności analizowanych parametrów zastosowano analizy: zmienności czasowej, korelacji liniowej i składowych głównych (PCA).

Uzyskane rezultaty wskazują na odmienną dla obu studni strukturę zmienności czasowej analizowanych parametrów, co dotyczy szczególnie PEW i Q. Kierunki zmian długookresowych dla Z-3a wskazują na możliwe obniżanie się PEW w odpowiedzi na wzrost Q i związane z tym pogłębienie depresji. Widoczny jest odmienny wpływ eksploatacji na parametry obserwowane w studniach Z-2 i Z-3a. Różnice dotyczą głównie wywołanej eksploatacją depresji i warunkowanych tym kierunków i wielkości zmian PEW. Najprawdopodobniej wynikają one z odmiennej wydajności jednostkowej poszczególnych studni oraz odrębnego mechanizmu dopływu wód wymuszonego eksploatacją. Jest to ważne z punktu widzenia stałości składu chemicznego wód leczniczych w warunkach współdziałania studni, ponieważ w pewnej mierze studnie reagują odwrotnie na zmiany eksploatacji. Zmiany PEW są bezpośrednim następstwem wywołanych eksploatacją zmian natężenia napływu wód o podwyższonym stężeniu CO_2 i/lub naturalnych zmian natężenia jego migracji. Natężenie migracji CO_2 w obu studniach jest niezależne od siebie nawzajem i nie jest warunkowane w istotnym stopniu zmiennością eksploatacji. Wskazuje to na mozaikowy i skupiony charakter występowania stref migracji CO_2 z głębszego podłoża, co potwierdza obserwowane na badanym terenie współwystępowanie wód zwykłych i leczniczych.

W publikacji B.19 skoncentrowano się na częstym problemie ujęć wód podziemnych zlokalizowanych na tarasach cieków powierzchniowych, który dotyczy zmian składu chemicznego ujmowanych wód postępujących w miarę upływu czasu eksploatacji. Zmiany stężeń poszczególnych jonów mogą stwarzać w skrajnych przypadkach konieczność wprowadzenia dodatkowego uzdatniania wód. Dobrym przykładem występowania dużej zmienności stężeń składników chemicznych wód podziemnych wywołanych długotrwałą eksploatacją jest wielootworowe ujęcie zakładu metalurgicznego Arcelor-Mittal Steel S.A. w Krakowie, które wykorzystywane jest, jako źródło wody do picia.

Analizę zmienności czasowej w okresie 1990-2000 przeprowadzono dla związków Fe i Mn, jonów SO_4^{2-} , suchej pozostałości mineralnej oraz twardości ogólnej. Uzyskane rezultaty wskazują na istotny wpływ długości czasu eksploatacji na zmienność stężeń/wartości tych składników. Przedstawiono wartości zmian stężeń wybranych

parametrów wraz z podaniem współczynnika zmienności oraz kierunków ich zmian. Dla większości analizowanych parametrów zaznacza się wzrost wartości stężeń.

7.2.6 Wykorzystanie wód termalnych w aspektach poza energetycznych

W ramach swojej aktywności naukowej zajmowałem się również zagadnieniami związanymi z wodami termalnymi Niecki Podhalańskiej oraz możliwościami ich wykorzystania w aspekcie innym niż energetyka geotermalna (B.21 i B.26).

W pracy B.21 zaprezentowano charakterystykę warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych wód podziemnych (termalnych i słodkich) w rejonie Bańskiej Niżnej oraz przedstawiono uwarunkowania funkcjonowania pilotowej instalacji odsalania wód termalnych w aspektach środowiskowych i ekonomicznych. Uzyskane rezultaty wskazują, iż funkcjonowanie instalacji odsalania wód termalnych w skali przemysłowej może z dużym prawdopodobieństwem mieć niekorzystny wpływ na zasoby ilościowe i jakościowe tych wód. Przeprowadzona analiza czasu zwrotu zainwestowanego kapitału dla pilotowej instalacji odsalania wód termalnych wskazuje na możliwą nieopłacalność ekonomiczną funkcjonowania tej instalacji, właściwie niezależnie od skali przedsięwzięcia.

Tematyka związana z wodami termalnymi i potencjalnymi obszarami zastosowań tych wód była kontynuowana w publikacji (B.26). W tej publikacji zaprezentowano wstępną analizę możliwości wykorzystania koncentratu poprodukcyjnego uzyskanego w wyniku procesu odsalania wód termalnych przy wykorzystaniu metody odwróconej osmozy. Analizę przeprowadzono, zakładając wykorzystanie części wód eksploatowanych otworem geotermalnym Bańska IG 1 w Bańskiej Niżnej. Obliczono zmianę wskaźników nasycenia dla wybranych minerałów podczas zwiększania stopnia odzysku czystej wody (konwersji). Uwzględniając obliczone zmiany stężenia koncentratu i wskaźników nasycenia podczas konwersji, stwierdzono, iż perspektywiczne wydaje się wykorzystanie uzyskanego koncentratu do celów balneologicznych i/lub rekreacyjnych. Zastosowanie koncentratu może być jednakże uwarunkowane usunięciem nadmiernej ilości jonów boru. Uzyskany w procesie odsalania koncentrat może teoretycznie zawierać od ok. 30 do ponad 60 [mg·L⁻¹] boru przy konwersji odpowiednio od 75 do ponad 93%. Inne warianty wykorzystania koncentratu, jako: źródło odzyskiwania boru i/lub strontu w skali przemysłowej, czy też, jako sól drogową uznano za nieperspektywiczne.

7.2.7 Analiza struktury eksploatacji i bezpośredniego wykorzystania wód podziemnych

Niektóre z moich tematów badawczych dotyczyły także zagadnień związanych z wykorzystaniem zasobów wód podziemnych (B.20 i B.23). W publikacji B.23 poruszono problematykę struktury wykorzystania i zagrożeń wód podziemnych występujących w obszarze zlewni Gwdy. Obszar zlewni Gwdy wyróżnia swoista asymetria eksploatacji wód podziemnych i rozpoznania warunków hydrogeologicznych, która dotyczy przede wszystkim głębokich poziomów wodonośnych. Kompleksowe rozpoznanie warunków hydrogeochemicznych, współwystępowania i krążenia wód podziemnych w strefie aktywnej wymiany umożliwiło sformułowanie wskazówek odnośnie wykorzystania wód podziemnych w tym rejonie. Zwrócono uwagę na występowanie specyficznych uwarunkowań hydrogeologicznych związanych z obecnością zaburzeń glacictonicznych i struktur erozyjnych (doliny kopalne i rynny subglacjalne), które mają potencjalny wpływ stan ilościowy i jakościowy

zasobów wód podziemnych w badanym obszarze. Wskazano także na potrzebę prowadzenia racjonalnej eksploatacji wód podziemnych dla ujęć zagrożonych występowaniem ascenzji wód z poziomów mezozoicznych i wzmoczenie ochrony pośredniej wód głębszych poziomów wodonośnych, szczególnie w obszarach znaczącego zanieczyszczenia płytkich poziomów wodonośnych.

Wybrane aspekty ochrony wód podziemnych i gospodarki wodnej obszaru zachodniej części Karpat przedstawiono w publikacji B.20. Przeglądowa prezentacja warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych przedstawiona w tej pracy może stanowić przyczynek do optymalizacji gospodarki wodami podziemnymi w badanym obszarze. Przeglądowy charakter mają także Mapy hydrogeologiczne Polski (MhP) w skali 1:50 000 wykonane dla obszaru północnej części Niżu Polskiego (arkusze: Złotów, Wysoka i Brodnica - odpowiednio D.2, D.3 i D.4). Poszczególne arkusze MhP przedstawiają warunki hydrogeologiczne użytkowych poziomów wodonośnych z szerszą interpretacją dotyczącą poziomu stanowiącego główne źródło zaopatrzenia w wodę. Zakres tematyczny MhP obejmuje m. in.: wodonośność, hydrodynamikę, jakość wód podziemnych oraz zagrożenia wód podziemnych i dostarcza informacji o zwykłych wodach podziemnych w zakresie niezbędnym do podejmowania decyzji na szczeblu samorządów terytorialnych, administracji regionalnej oraz przy planowaniu działań obejmujących zagospodarowanie przestrzenne.

Moja aktywność naukowa obejmuje także zagadnienia związane z praktycznym aspektem wykorzystania wód podziemnych/powierzchniowych, dotyczące zróżnicowania zapotrzebowania na wodę na cele bytowe w gospodarstwach wiejskich. Przyczyną przeprowadzenia takich badań był fakt, iż obecnie w polskich przepisach prawnych i zaleceniach projektowych brak jest poprawnych wytycznych wykorzystywanych do projektowania wiejskich systemów wodociągowych. W publikacji B.28 przeprowadzono analizę wielkości i nierównomierności dobowego zużycia wody na cele bytowe, w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych w okresie jednego roku w wybranym gospodarstwie wiejskim. W badaniach wykorzystano rozbudowany systemu opomiarowania zużycia wody, odczytywany automatycznie i współpracujący z rejestratorami.

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują, iż rzeczywiste zużycie wody jest znacznie mniejsze od podawanego w wytycznych oraz potwierdziły fakt występowania istotnej statystycznie zmienności zużycia wody na cele bytowe w poszczególnych dniach tygodnia. Jednostkowe zużycie wody kształtujące się średnio na poziomie $65,5 \text{ [dm}^3 \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}]$ potwierdza trend oszczędnego i racjonalnego gospodarowania wodą. Z uwagi na zmianę charakteru i funkcji gospodarstw zlokalizowanych na terenach wiejskich, zmienia się również struktura czasowa poboru wody. Obrazuje to między innymi współczynnik nierównomierności dobowej, którego wartość (3,41) jest ponad 2,5-krotnie większa niż podawana dotychczas w wytycznych projektowych.

7.2.8 Hydroenergetyczne wykorzystanie wód powierzchniowych i jego wpływ na wody podziemne

Publikacje B.9 i B.2 należą do grupy publikacji, w których zajmowałem się problematyką związaną z hydroenergetyką. W publikacji B.2 przedstawiono rzeczywisty potencjał hydroenergetyczny rzeki Mszanki obliczony w oparciu o rozpoznanie realnych (najbardziej prawdopodobnych) możliwości realizacji małych elektrowni wodnych. Uzyskane rezultaty wskazują, iż wartość instalowanej mocy w nowych małych elektrowniach wodnych wynosi 165 [kW], a wyprodukowana w nich energia elektryczna będzie oscylować na poziomie $11 \cdot 10^5$ [kWh]. Są to wartości znacznie mniejsze (ponad jeden rząd wielkości) od wartości

potencjałów teoretycznego i technicznego. Pod uwagę zostały wzięte wszystkie możliwe do zagospodarowania energetycznego istniejące budowle wodne. Uznano także, że budowa nowych spiętrzeń wyłącznie w celach hydroenergetycznych w warunkach polskich jest niezwykle trudna do realizacji.

W kolejnej publikacji (B.9) poruszono problem wpływu funkcjonowania małych elektrowni wodnych na warunki hydrodynamiczne i hydrogeochemiczne płytkich poziomów wodonośnych. Analizę przeprowadzono w oparciu o kryterium zlewniowe, czyli dla obszarów jednolitych części wód podziemnych (JCWPd) znajdujących się w zasięgu oddziaływania poszczególnych elektrowni. Stwierdzono, iż w typowych układach hydrodynamicznych dla rzek drenujących piętrzenie wód powierzchniowych może zwiększać zasoby wód podziemnych w wyniku wymuszonego podwyższenia położenia zwierciadła wód podziemnych względem rzędnej wody w cieku. Obniża to jednak możliwości samooczyszczania się środowiska wód podziemnych poprzez zmniejszenie miąższości strefy aeracji, która tworzy naturalną barierę ochronną. W przypadku, gdy nie istnieje ryzyko migracji zanieczyszczeń z powierzchni terenu, zmiana miąższości strefy aeracji pozostaje praktycznie bez wpływu na jakość wód podziemnych.

Moim zdaniem, wyniki uzyskane w scharakteryzowanych powyżej publikacjach mają znaczenie w kontekście rozwoju dyscypliny ochrona i kształtowanie środowiska, ponieważ wskazują na istotne aspekty związane z ochroną jakościową i ilościową wód podziemnych w środowiskach hydrogeologicznych o zróżnicowanej budowie i warunkach przepływu. Dotyczy to przede wszystkim wskazania obszarów potencjalnie podatnych na propagację zanieczyszczeń, co jest rezultatem lepszego zrozumienia warunków krążenia i mechanizmów kształtowania składu chemicznego wód podziemnych w poszczególnych systemach wodonośnych. Obszary takie wymagają wzmożonej ochrony i/lub monitoringu z uwagi na ich istotne znaczenie dla całego systemu wodonośnego, co wynika przede wszystkim z występowania silnej więzi hydraulicznej pomiędzy różnymi poziomami wodonośnymi. Dotyczy to zarówno terenów występowania użytkowych poziomów wodonośnych, jaki i stref zasilania wód podziemnych. Przeprowadzone badania pozwoliły także na sformułowanie wskazówek odnośnie trybu eksploatacji wód leczniczych w obszarze doliny Popradu, a także eksploatacji wód zwykłych w specyficznych warunkach hydrologicznych, w obszarach występowania erozyjnych struktur kopalnych i zaburzeń głacictonicznych. Uzyskane wnioski i spostrzeżenia mają zarówno znaczenie lokalne, jak i też wynikają z nich pewne bardziej ogólne implikacje, które mogą znaleźć zastosowanie na obszarach o zbliżonych warunkach hydrogeologicznych.

7.2.9 Pozostałe zagadnienia badawcze niezwiązane bezpośrednio z hydrogeologią

W ramach pracy naukowo-badawczej poruszałem również zagadnienia z poza obszaru hydrogeologii, lecz w których wody podziemne są istotnym czynnikiem wpływającym na analizowane zjawiska. Prace te były realizowane przed uzyskaniem doktoratu. W publikacji C.4 została zaprezentowana ocena wpływu prowadzenia długotrwałych odwodnień na wystąpienie osiadań w podłożu budowlanym domów mieszkalnych na ulicy Kaszubskiej w Toruniu. Uzyskane rezultaty badań wskazują, iż nietypowe oddziaływanie prac odwodnieniowych

wywołane zostało dwoma niezależnymi do siebie procesami, związanymi z obniżeniem zwierciadła wód podziemnych i prowadzącymi do wystąpienia nierównomiernych osiadań podłoża budowlanego.

W kolejnej pracy związanej z tą tematyką przedstawiono symulację naprężeń oraz prognozę osiadań w podłożu projektowanego składowiska odpadów komunalnych Barycz III (C.5). Symulację oddziaływania składowiska na podłoże gruntowe przeprowadzono wielowariantowo, dla dwóch modeli cyfrowych zbudowanych z zastosowaniem metody elementów skończonych. Uzyskane wyniki wskazują, że potencjalne deformacje dna wykopu związane z odprężeniem będą stanowić $0,18 \div 1,4\%$ miąższości usuniętego nadkładu. Przy czym średnio jest to wartość rzędu $0,8 \div 1,0\%$ i odprężeniu ulegać będzie tylko bezpośrednie podłoże składowiska. Modelowanie interakcji pomiędzy bryłą składowanych odpadów a podłożem wskazuje także na możliwość rozwoju stref uplastycznienia i wyparcia gruntu spod bryły składowiska, które może wykazywać tendencje do zagłębiania się w podłoże.

W swojej pracy naukowej poruszałem również zagadnienia nie dotyczące bezpośrednio nauk środowiskowych. Jednym z takich tematów badawczych była analiza zróżnicowania kosztów doszczelnienia mieszkaniowych instalacji gazowych w zależności od metody doszczelnienia tej instalacji: spawania lub uszczelniania chemicznego (B.5). Badania prowadzono dla porównywalnych ze sobą obiektów, czyli wybranych budynków mieszkalnych wybudowanych w latach 50. XX wieku na terenie starej części dzielnicy Nowa Huta w Krakowie. W celu analizy danych zastosowano nieparametryczną wersję analizy wariancji (test U Manna-Whitneya). Uzyskane rezultaty wskazują na brak istotnego zróżnicowania pomiędzy metodami doszczelnienia a badanymi parametrami tj. (liczbą mieszkań, powierzchnią użytkową oraz kosztami doszczelnienia). Znaczne zróżnicowanie kosztów jednostkowych w czasie wskazuje, iż poza wzrostem cen towarów/usług występują inne czynniki determinujące koszt doszczelnienia. Analiza kosztów doszczelnienia w odniesieniu do liczby mieszkań pozwoliła na wskazanie optymalnej metody doszczelnienia wraz z uwzględnieniem jej specyfiki.

7.3 Staże naukowe

Odbyłem następujący naukowy staż zagraniczny:

01-30 września 2018, Institute of Sustainable Development, Lviv Polytechnic National University, Ukraine. Opiekunem naukowym była dr Irena Kazymyra obecnie pełniąca funkcję dziekana Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development.

7.4 Projekty badawcze

- ✓ Grant Uniwersytetu Mikołaja Kopernika nr 331-G. Grant został przyznany przez Dział Nauki UMK na realizację oceny wpływu odwodnień na wystąpienie osiadań w podłożu budowlanym na przykładzie ulicy Kaszubskiej w Toruniu. W tym grantie pełniłem rolę kierownika i głównego wykonawcy.
- ✓ Grant Komitetu Badań Naukowych KBN nr N525 009 32/1076 Grant został przyznany na realizację badań dotyczących formowania się składu chemicznego, systemów krążenia i prognozy zmian jakości wód podziemnych w obrębie kenozoicznych poziomów wodonośnych na obszarze zlewni Gwdy. Kierownikiem grantu był prof. Andrzej Sadurski. W tym grantie pełniłem rolę głównego wykonawcy.

7.5 Konferencje naukowe

Wygłosiłem referaty lub przedstawiłem postery na następujących konferencjach:

- 1) XVIII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 8-10 listopada 2017 r., Wrocław-Wojanów. Referat pt: Zastosowanie metody GC/TCD oznaczania He, Ne i Ar w wodach podziemnych do oceny ich wieku, na przykładzie wód z rejonu Buska-Zdroju.
- 2) XVIII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 8-10 listopada 2017 r., Wrocław-Wojanów. Referat pt: Zmienność parametrów eksploatacyjnych i fizykochemicznych wód leczniczych ujęcia Zubrzyk w warunkach współdziałania otworów.
- 3) II Ogólnopolska Konferencja Innowacyjnych Projektów Badawczych, 2 września 2016, e-konferencja, <http://www.konferencja-ipb.pl/>, Wystąpienie w sesji posterowej pt: Zastosowanie metod analitycznych w ocenie odporności wód podziemnych na zanieczyszczenia antropogeniczne;
- 4) XVII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 20–23 października 2015, Ustka. Referat pt: Zastosowanie metody helowej do datowania i rozpoznania warunków krążenia wód podziemnych w zlewni Gwdy;
- 5) XVII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 20–23 października 2015, Ustka. Wystąpienie w sesji posterowej pt: Metody analityczne w ocenie odporności systemów wód podziemnych na zanieczyszczenia antropogeniczne;
- 6) XV Międzynarodowa Konferencja Ekologiczna "Walory przyrodnicze i turystyczne północnej części Euroregionu Karpackiego. Brzozów, 23-25.09.2014. Referat pt. Ocena sposobów zaopatrzenia w wodę małej miejscowości podgórskiej;
- 7) Konferencja naukowa z okazji 150. rocznicy urodzin Karola Bohdanowicza *Przemiany środowiska naturalnego, rozwój zrównoważony i zasoby surowców mineralnych Polski*. 25-26.09.2014. Wystąpienie w sesji posterowej pt: Metody analityczne w ocenie odporności systemów wód podziemnych na zanieczyszczenia antropogeniczne;
- 8) XII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna. Krynica Zdrój 23-25.04.2014. Wystąpienie w sesji posterowej pt: Zmienność składu chemicznego wód podziemnych w studniach ujęcia „Krzyżowe drogi” w Stalowej Woli;
- 9) XX Konferencja Naukowa – Infrastruktura i Środowisko. Dobczyce 10-12.06.2013. Referat pt: Wykorzystanie metod statystycznych w identyfikacji chemizmu wód podziemnych na przykładzie województwa małopolskiego;
- 10) XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa ENVIRO. Kraków – Dobczyce 20–21.09.2012 r. Racjonalne kształtowanie i ochrona zasobów wodnych na obszarach wiejskich. Referat pt. Wpływ eksploatacji wód termalnych na zmiany ich mineralizacji oraz możliwości wykorzystania na przykładzie Bańskiej Niżnej;
- 11) XII Międzynarodowa Konferencja Ekologiczna "Człowiek a ochrona dziedzictwa przyrodniczego i kulturowego w Karpatach. Brzozów, 27-29.09.2011. Referat pt. Koncepcja instalacji odsalania wód termalnych w Bańskiej Niżnej – możliwości zagospodarowania koncentratu poprocesowego;

- 12) XV Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 14-16.09.2011, Poznań-Żerków. Referat pt. Koncepcja instalacji odsalania wód termalnych w Bańskiej Niżnej – możliwości zagospodarowania koncentratu podprocesowego;
- 13) XIV Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 16-18.09.2009, Sosnowiec. Referat pt. Geneza siarczanów w głębokim plejstoceńskim poziomie wodonośnym w rejonie Wysokiej na podstawie badań izotopowych i mikrobiologicznych;
- 14) XIII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 21-23.06.2007, Kraków-Krynica. Referat pt. Skład izotopowy wody oraz siarczanów w głębokim plejstoceńskim poziomie wodonośnym w obrębie struktury kopalnej w pobliżu Wysokiej (Pojezierze Krajeńskie).

Brałem udział w następujących konferencjach:

- 1) XXXVII International Association of Hydrogeologists World Congress - Groundwater quality sustainability, 12-17.09.2010, Kraków;
- 2) II Ogólnopolski Kongres Geotermalny, 23-25.09.2009, Bukowina Tatrzańska;
- 3) II Konferencja Modelowanie Przepływu Wód Podziemnych, 16-17.11.2006, Ciężen k/Poznań;
- 4) XII Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 06-09.06.2005, Toruń;
- 5) XI Sympozjum Współczesne Problemy Hydrogeologii, 03-05.09.2003, Jastrzębia Góra.

7.6 Recenzje

Wykonałem pięć recenzji dla czasopism/platform elektronicznych znajdujących się na liście JCR i/lub indeksowanych przez Scopus: E3S Web of Conferences 0029 (2018), Science of the Total Environment (2017), Acta Physica Polonica (2016) i Polish Journal of Environmental Studies (2x 2014).

Wykonałem również trzy recenzje dla czasopism nieposiadających IF: Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus (2018 i 2016) i Inżynieria Ekologiczna (2016).

Wykonałem także jedną recenzję końcową po zakończeniu realizacji grantu badawczego (2013) przyznanego przez Narodowego Centrum Nauki.

7.7 Nagrody za osiągnięcia naukowe

W roku 2015 otrzymałem Nagrodę Rektora Uniwersytetu Rolniczego III stopnia za osiągnięcia w działalności naukowej.

Tomasz Kłopotowski

.....
(podpis Wnioskodawcy)

8. LITERATURA

- Lupton, J., Evans L. 2013 – Changes in the atmospheric helium isotope ratio over the past 40 years. *Geophys. Res. Lett.* 40 (23), 6271–6275.
- Najman J., 2008 – PhD thesis., Elaboration of gas chromatographic method of helium concentration measurements in groundwater for dating in hydrological problems, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, Kraków, Poland.
- Oxburgh E.R., O'Nions R.K., Hill R.I. 1986 – Helium isotopes in sedimentary basins. *Nature*, 324(18), 632–635
- Zuber A. 2007 – Metoda helowa datowania wód podziemnych. [w:] *Współczesne problemy hydrogeologii*, (Szczepański A., Kmiecik E., Żurek A., red), 13(2), 381–388.
- Zuber A., Ciężkowski W., Różański K. (red.) 2007 – *Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych – poradnik metodyczny*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Mabry J., Lan T., Burnard P., Marty B. 2013 – High-precision helium isotope measurements in air. *J. Anal. At. Spectrom.* 28(12), 1903-1910.
- Pusz J., Lasa J., Śliwka I., 2007 - Metoda chromatografii gazowej w pomiarach stężenia helu w wodach podziemnych. [w:] *Współczesne problemy hydrogeologii*, (Szczepański A., Kmiecik E., Żurek A., red), 13(2), 303–311.
- Najman J., Śliwka I., 2013 – Rozwój metody jednoczesnego pomiaru stężenia helu, argonu oraz neonu dla datowania wód podziemnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 456: 419–424.
- Różański K., Zuber A., 2000 - Wody infiltracji glacialnej w Europie - mit czy rzeczywistość. *Przegląd Geologiczny*, 48(9): 796-803.
- Nowicki Z., 1999 - Skład izotopowy wód infiltrujących w późnym plejstocenie i holocenie na obszarze Polski centralnej. *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, 9, (red.) S. Krajewski & A. Sadurski. *Państw. Inst. Geol.*, 259-266.
- Lisik R., 2010, Lecznicze wody siarczkowe rejonu Pińczów – Busko-Zdrój – Kazimierza Wielka. [w:] *Wody siarczkowe w rejonie Buska-Zdroju* (Lisik R., red.), 23-86
- Andrews J.N., Goldbrunner J.E., Darling W.G., Hooker P., Wilson G.B., Youngman M.J., Echinger L., Rauert W., Stichler W., 1985 – A radiochemical, hydrochemical and dissolved gas study in the Molasse basin of Upper Austria. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73, 317-332
- Wysota W., Lankauf K.R., Szymańska J., Chruścińska A., Oczkowski H.L., Przegiętka K.R., 2002. Chronology of the Vistulian (Weichselian) glacial events in the lower Vistula region, middle-north Poland. *Geochronometria* 21, 137-142.
- Ber A., Lindner L., Marks L., 2007. Propozycja podziału stratygraficznego czwartorzędu Polski. *Przegląd Geologiczny*, 55(2), 115-118.