

**MONITORING PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO REALIZOWANY W
RAMACH PAŃSTWOWEGO MONITORINGU ŚRODOWISKA W LATACH
2018-2020**

**ZADANIE 2:
MONITORING SKAŻEŃ PROMIENIOTWÓRCZYCH WÓD
POWIERZCHNIOWYCH I OSADÓW DENNYCH**

ETAP III

RAPORT

Rok 2020

M. Kardaś, M. Suplińska, B. Rubel, A. Matysiak, A. Fulara, K. Wiatr,
K. Pachocki, E. Starościak, K. Wojtkowski



Opracowanie wykonano na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska
(umowa nr 32/2019/F z dnia 27.08.2019 r.) finansowane ze środków Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej



Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Kwiecień 2021

WSTĘP

Celem pracy było oznaczenie skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych. W ramach Państwowego Monitoringu Środowiska oznaczono ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach oraz ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ i ^{238}Pu w osadach dennych.

Próbki wody i osadów dennych pobierano w 18 punktach, usytuowanych w dorzeczu Wisły (7 punktów), w dorzeczu Odry (5 punktów) i w sześciu jeziorach. Terminy poboru próbek w roku 2020 były następujące:

1. Termin wiosenny – od 22 maj do 19 czerwca;
2. Termin jesienny - od 25 września do 7 października.

1. LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH Z PRZEDSTAWIENIEM NA MAPIE.

Usytuowanie miejsc poboru próbek przedstawia Rys. 1, a wykaz punktów poboru wody i osadów dennych oraz współrzędne geograficzne miejscowości, w których pobierano próbki podano w Tabeli 1. i 2.



Rys. 1. Usytuowanie miejsc poboru wód i osadów dennych

Tabela 1. Punkty poboru próbek wody i osadów dennych z jezior

Jezioro i miejsce poboru	Województwo	Data poboru próbek wiosna 2020	Data poboru próbek jesień 2020	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Drawsko, Stare Drawsko	<i>zachodnio-pomorskie</i>	19.06	01.10	16°11'51"	53°36'08"
Wadąg, Myki	<i>warmińsko-mazurskie</i>	22.05	06.10	20°32'35"	53°49'10"
Partęczyny, Wielkie Partęczyny	<i>kujawsko-pomorskie</i>	29.05	07.10	19°13'02"	53°28'13"
Rogóźno, Rogóźno	<i>lubelskie</i>	05.06	28.09	22°59'25"	51°22'03"
Niesłysz, Niesulice	<i>lubuskie</i>	18.06	30.09	15°24'05"	52°12'41"
Wigry, Stary Folwark	<i>podlaskie</i>	22.05	06.10	23°03'24"	54°05'07"

Tabela 2. Punkty poboru próbek wody i osadów dennych z rzek

Rzeka	Miejsce poboru próbek	Data poboru próbek wiosna 2020	Data poboru próbek jesień 2020	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Wisła	Kraków Tyniec	05.06	28.09	20°10'48"	50°42'50"
	Annopol	05.06	28.09	21°51'33"	50°53'10"
	Warszawa	26.06	25.09	21°00'59"	52°14'07"
	Płock	29.05	07.10	19°41'52"	52°32'50"
	Kiezmark	29.05	07.10	18°55'51"	54°15'14"
Narew	Pultusk	22.05	06.10	21°05'08"	52°42'18"
Bug	Wyszków	22.05	06.10	21°27'22"	52°36'10"
Odra	Chałupki	17.06	29.09	18°19'10"	49°55'22"
	Wrocław	17.06	29.09	16°59'31"	51°08'01"
	Głogów	17.06	29.09	16°04'55"	51°39'11"
	Krajnik	18.06	30.09	14°28'50"	53°11'44"
Warta	Poznań	19.06	01.10	16°55'21"	52°24'30"

2. OPIS METODY POBORU I POMIARU PRÓBEK WODY I OSADÓW DENNYCH

Pobór próbek i wstępna preparatyka

Próbki wody z rzek pobierano z głównego nurtu, natomiast wodę z jezior z pomostów, przy użyciu obciążonego wiadra z liną. Objętość próbki wynosiła 20 litrów. Wodę z wiadra przenoszono do pojemników polietylenowych i zakwaszano kwasem azotowym. Osady denne pobierano używając szufelki, z trzech miejsc oddalonych od siebie o ok. 50 m i sporządzano próbkę zbiorczą o masie ok. 1 kg. Po przywiezieniu do laboratorium wodę odparowywano z dodatkiem kwasu azotowego; osady denne po usunięciu kamyków i części roślin, suszono w temp. 105°C do stałej wagi i przesiewano przez sito o średnicy oczek 2 mm.

CLOR posiada wdrożony System Zarządzania Laboratorium wg normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 i poniżej opisane metody są stosowane od wielu lat.

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs , ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych oraz ^{90}Sr w wodach oznaczano zgodnie z metodami akredytowanymi.

Wszystkie metody wykorzystywane w oznaczaniu izotopów promieniotwórczych w tej pracy posiadają zatwierdzenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki.

W celu zapewnienia jakości laboratorium bierze udział w porównaniach między laboratoryjnych krajowych i zagranicznych osiągając bardzo dobre wyniki.

^{137}Cs i ^{90}Sr w wodzie

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr oznaczano w tej samej próbce. Metoda oznaczania ^{137}Cs polega na selektywnej sorpcji cezu na złożu fosfomolibdenianu amonu (AMP) i pomiarze aktywności β preparatu. Do oznaczenia stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr stosowano metodę polegającą na oznaczeniu ^{90}Y , krótko żyjącego izotopu ($T_{1/2}$ - 64,2 h) powstającego w wyniku rozpadu ^{90}Sr . Analizę prowadzono w obecności, ^{85}Sr , co pozwoliło na określenie wydajności ^{90}Sr . Wydajność radiochemiczna oznaczeń stężenia promieniotwórczego, ^{90}Sr wynosiła od 76 do 100%.

Do pomiaru aktywności ^{137}Cs i ^{90}Sr stosowano niskotłowy zestaw aparaturowy, produkcji duńskiej, oparty na licznikach przepływowych GM (Riso GM-25-5) o biegu własnym około 0,2 imp/min. Kalibrację aparatury prowadzono za pomocą roztworów wzorcowych ^{137}Cs i ^{90}Sr . Wzorce do kalibracji aparatury wykonywano w taki sam sposób jak analizowane próbki. Wydajność osadzania ^{137}Cs na złożu AMP wynosi ok. 99%, a jego granica oznaczalności dla czasu pomiaru 180 min wynosi 0,32 mBq l⁻¹. Granica

oznaczalności stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr dla czasu pomiaru 120 min wynosi $0,45 \text{ mBq l}^{-1}$.

^{137}Cs , ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych oznaczano metodą spektrometrii gamma. Po wstępnej preparatyce naważki osadu przenoszono do pojemników typu Marinelli o objętości 450 ml i umieszczano w układzie pomiarowym.

Stosowany do pomiaru spektrometr składa się z detektora germanowego (HP Ge) znajdującego się w ołowianym domku osłonowym o grubości ścianek 10 cm i wyłożonym 2-mm warstwą miedzi. Detektor połączony jest z wielokanałowym analizatorem amplitudy impulsów MULTIPORT II MCA z oprogramowaniem spektrometrycznym GENIE-2000 firmy Canberra. Zdolność rozdzielcza detektora wynosi 1,8 keV dla ^{60}Co (1332 keV), a względna wydajność 33%. Czas pomiaru dobierano w taki sposób, aby błąd pomiaru nie przekraczał 10%. Granica detekcji przy czasie pomiaru 150000 s wynosi $0,40 \text{ Bq kg}^{-1}$ suchej masy osadu dennego.

Zasada metody oznaczania stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ i ^{238}Pu polega na wydzieleniu plutonu z badanej próbki, elektrodepozycji i pomiarze aktywności metodą α -spektrometryczną. Analizę prowadzono w obecności znacznika (^{242}Pu), co pozwala na określenie wydajności chemicznej i wydajności pomiaru. Pluton wydzielano z próbki stosując wymianę jonową, a następnie prowadzono elektrodepozycję na krążkach stalowych. Aktywność izotopów plutonu mierzono metodą spektrometrii alfa. Układ pomiarowy składał się z detektorów krzemowych typu PIPS (implantowane, płaskie o pasywowanej powierzchni) umieszczonych w komorach próżniowych i połączonych z analizatorem wielokanałowym Multiport II MCA (Canberra MP2-GE) z oprogramowaniem spektrometrycznym GENIE 2000. Pomiar prowadzono przez 164000 s, a granica detekcji wynosiła $0,2 \text{ mBq/}$ próbkę.

3. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs I ^{90}Sr W PRÓBKACH WODY POBRANEJ W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2020 ROKU

3.1. Ocena zawartości ^{137}Cs w wodach badanych rzek z uwzględnieniem podziału na dorzecza

W Tabeli 3. przedstawione są stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w próbkach wody z poszczególnych miejsc poboru próbek w rzekach w okresie wiosennym i jesiennym 2020 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach rzek mieściły się w granicach od 2,56 mBq l⁻¹ w Bugu (Wyszaków) do 5,64 mBq l⁻¹ w Odrze (Głogów). Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs dla dorzecza Odry mieścił się w przedziale od 3,06 (Warta, Poznań) do 5,64 mBq l⁻¹ (Odra, Głogów), a dla dorzecza Wisły od 2,56 (Bug, Wyszaków) do 4,79 mBq l⁻¹ (Wisła, Płock).

Tabela 3. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach Wisły, Odry i ich dopływów w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{137}Cs , wiosna mBq l ⁻¹	^{137}Cs , jesień, mBq l ⁻¹	^{137}Cs , średnia roczna mBq l ⁻¹
DORZECZE WISŁY				
1.	Wisła Kraków Tyniec	3,75 ± 0,18 ^{a)}	5,61 ± 0,52 ^{a)}	4,68 ± 1,32 ^{b)}
2.	Wisła Annopol	4,49 ± 0,22	3,08 ± 0,37	3,79 ± 1,00
3.	Wisła Warszawa	3,96 ± 0,20	3,43 ± 0,38	3,70 ± 0,37
4.	Wisła Płock	5,76 ± 0,26	3,81 ± 0,41	4,79 ± 1,38
5.	Wisła Kieżmark	3,56 ± 0,20	3,05 ± 0,37	3,31 ± 0,36
6.	Narew Pułtusk	2,72 ± 0,16	3,38 ± 0,38	3,05 ± 0,47
7.	Bug Wyszaków	1,82 ± 0,14	3,30 ± 0,38	2,56 ± 1,05
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	3,63 ± 0,22	5,04 ± 0,48	4,34 ± 1,00
9.	Odra Wrocław	5,00 ± 0,28	3,86 ± 0,42	4,43 ± 0,81
10.	Odra Głogów	5,26 ± 0,26	6,01 ± 0,53	5,64 ± 0,53
11.	Odra Krajnik	3,37 ± 0,20	3,81 ± 0,41	3,59 ± 0,31
12.	Warta Poznań	2,25 ± 0,18	3,86 ± 0,40	3,06 ± 1,14

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 95%

^{b)}Wartość średnia ± Odchylenie Standardowe (OS)

3.2. Ocena zawartości ^{90}Sr w wodach badanych rzek z uwzględnieniem podziału na dorzecza

W Tabeli 4. przedstawiono stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych rzek w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 roku.

Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr wynosi odpowiednio: dla dorzecza Wisły od 1,73 do 2,76 mBq l^{-1} , a dla dorzecza Odry od 1,98 do 2,92 mBq l^{-1} .

Tabela 4. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{90}Sr , wiosna mBq l^{-1}	^{90}Sr , jesień, mBq l^{-1}	^{90}Sr średnia roczna mBq l^{-1}
DORZECZE WISŁY				
1.	Wisła Kraków Tyniec	2,55 ± 0,29 ^{a)}	2,77 ± 0,32 ^{a)}	2,66 ± 0,16 ^{b)}
2.	Wisła Annopol	2,46 ± 0,26	2,38 ± 0,25	2,42 ± 0,06
3.	Wisła Warszawa	3,00 ± 0,32	2,53 ± 0,25	2,76 ± 0,33
4.	Wisła Płock	2,01 ± 0,20	2,80 ± 0,30	2,40 ± 0,56
5.	Wisła Kieźmark	1,84 ± 0,21	2,18 ± 0,24	2,01 ± 0,24
6.	Narew Pułtusk	1,74 ± 0,18	1,71 ± 0,21	1,73 ± 0,01
7.	Bug Wyszaków	2,51 ± 0,26	2,32 ± 0,25	2,41 ± 0,14
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	2,82 ± 0,31	2,56 ± 0,26	2,69 ± 0,18
9.	Odra Wrocław	2,68 ± 0,31	3,01 ± 0,31	2,84 ± 0,23
10.	Odra Głogów	2,47 ± 0,28	3,37 ± 0,39	2,92 ± 0,64
11.	Odra Krajnik	1,46 ± 0,17	2,50 ± 0,27	1,98 ± 0,74
12.	Warta Poznań	1,68 ± 0,21	2,61 ± 0,31	2,14 ± 0,66

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 95% ^{b)}Wartość średnia ± Odchylenie Standardowe (OS)

Najwyższą wartość stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej jesienią z Odry w Głogowie – 3,37 mBq l^{-1} , najniższą zaś w próbce wody pobranej wiosną również z Odry w Krajniku – 1,46 mBq l^{-1} . Średnie roczne stężenie promieniotwórcze

⁹⁰Sr w wodach badanych rzek mieściło się w wąskim zakresie się od 1,73 mBq l⁻¹ w wodzie z Narwi (Pułtusk) do 2,92 mBq l⁻¹ w wodzie pobranej z Odry w Głogowie.

3.3. Ocena zawartości ¹³⁷Cs w wodach badanych jezior

W Tabeli 5. przedstawiono stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs w próbkach wody z poszczególnych miejsc poboru próbek w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym 2020 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu. Stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs oznaczone w wodach jezior mieściły się w granicach od 1,27 mBq l⁻¹ jesienią w jeziorze Drawsko do 4,98 mBq l⁻¹ w jeziorze Rogóžno wiosną. Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ¹³⁷Cs wynosił od 1,52 mBq l⁻¹ w jeziorze Drawsko do 4,02 mBq l⁻¹ w jeziorze Wigry. W tym roku najwyższe średnie wartości stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs odnotowywano w próbkach wody z jeziora Wigry i Rogóžno. Nie odbiega jednak znacząco od pozostałych średnich wartości stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs oznaczonego w pozostałych jeziorach. Biorąc pod uwagę ok. 15% błędu oznaczenia można stwierdzić, że średnia zawartość ¹³⁷Cs w wodach jezior w 2020 roku jest na wyrównanym poziomie.

Tabela 5. Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs w wodach jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	¹³⁷ Cs, wiosna mBq l ⁻¹	¹³⁷ Cs, jesień, mBq l ⁻¹	¹³⁷ Cs, średnia roczna mBq l ⁻¹
1	Wigry Stary Folwark	4,57 ± 0,22 ^{a)}	3,47 ± 0,39 ^{a)}	4,02 ± 0,78 ^{b)}
2	Wadąg Myki	4,61 ± 0,11	2,33 ± 0,32	3,47 ± 1,61
3	Wielkie Partęczyny Partęczyny	3,21 ± 0,18	2,18 ± 0,30	2,70 ± 0,73
4	Drawsko Stare Drawsko	1,77 ± 0,18	1,27 ± 0,21	1,52 ± 0,35
5	Niesłysz Niesulice	1,77 ± 0,14	2,84 ± 0,35	2,31 ± 0,76
6	Rogóžno Rogóžno	4,98 ± 0,22	3,01 ± 0,36	4,00 ± 1,39

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 95%.

^{b)}Wartość średnia ± Odchylenie Standardowe (OS)

3.4. Ocena zawartości ^{90}Sr w wodach badanych jezior

Tabela 6. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{90}Sr , wiosna mBq l ⁻¹	^{90}Sr , jesień, mBq l ⁻¹	^{90}Sr średnia roczna mBq l ⁻¹
1	Wigry Stary Folwark	1,25 ± 0,15 ^{a)}	1,25 ± 0,15 ^{a)}	1,25 ± 0,00 ^{b)}
2	Wadąg Myki	3,14 ± 0,31	1,87 ± 0,21	2,56 ± 0,86
3	Wielkie Partęcz. Partęczyny	1,90 ± 0,19	1,41 ± 0,17	1,66 ± 0,34
4	Drawsko Stare Drawsko	2,48 ± 0,28	2,12 ± 0,24	2,30 ± 0,26
5	Niesłysz Niesulice	1,50 ± 0,17	1,72 ± 0,20	1,61 ± 0,16
6	Rogóżno Rogóżno	7,84 ± 0,62	6,59 ± 0,59	7,22 ± 0,88

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 95%.

^{b)}Wartość średnia ± Odchylenie Standardowe (OS)

Tabela 6. przedstawia stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach z poszczególnych miejsc poboru w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym 2020 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych jezior wahało się od 1,25 mBq l⁻¹ w wodzie z jeziora Wigry do 7,22 mBq l⁻¹ w wodzie pobranej z Rogóżna. Najwyższą wartość stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej wiosną z jeziora Rogóżno – 7,84 mBq l⁻¹, najniższą zaś w próbce wody pobranej zarówno wiosną jak i jesienią z jeziora Wigry – 1,25 mBq l⁻¹. Niezmiennie od wielu lat najwyższe wartości stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr notuje się w próbkach wody z jeziora Rogóżno. W roku 2020 także oznaczono najwyższe wartości stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr , zarówno w próbce pobranej wiosną jak i jesienią.

3.5. Porównanie zawartości ^{137}Cs w wodach badanych rzek z zawartościami notowanymi w jeziorach

W Tabeli 7. przedstawiono średnie stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs dla wód dorzecza Wisły, dorzecza Odry i jezior, pobieranych w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenia promieniotwórcze tego izotopu.

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach dorzeczy Wisły oraz Odry i jezior wynosiły odpowiednio: 3,69; 4,21; 3,00 mBq l^{-1} .

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs oznaczono w wodach jeziornych w okresie jesiennym i wynosiło ono 2,52 mBq l^{-1} , najwyższe również jesienią w dorzeczu Odry – 4,52 mBq l^{-1} .

Najmniejsze różnice w stężeniach promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano dla wód jeziornych (1,27–4,98 mBq l^{-1}), największe dla dorzecza Wisły (1,81–5,76 mBq l^{-1}).

Tabela 7. Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego izotopu w 2020 r.

Lokalizacja poboru próbek	^{137}Cs mBq l^{-1} wiosna	^{137}Cs mBq l^{-1} jesień	^{137}Cs mBq l^{-1} średnia roczna	^{137}Cs mBq l^{-1} zakres
Dorzecze Wisły (7) ^{a)}	3,72 ± 1,25 ^{b)}	3,67 ± 0,89 ^{b)}	3,69 ± 1,05 ^{b)} (14)	1,81–5,76
Dorzecze Odry (5)	3,90 ± 1,24	4,52 ± 0,98	4,21 ± 1,10 (10)	2,25–6,01
Jeziora (6)	3,49 ± 1,46	2,52 ± 0,77	3,00 ± 1,22 (12)	1,27–4,98
Średnia ogólna (18)	3,69 ± 1,25	3,52 ± 1,16	3,61 ± 1,19 (36)	1,27–6,01

^{a)} Liczba próbek wody

^{b)} Wartość średnia ± Odchylenie Standardowe (OS)

3.6. Porównanie zawartości ^{90}Sr w wodach badanych rzek z zawartościami notowanymi w jeziorach

Tabela 8. Średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego izotopu w 2020 r.

Lokalizacja poboru próbek	^{90}Sr mBq l^{-1} wiosna	^{90}Sr mBq l^{-1} jesień	^{90}Sr mBq l^{-1} średnia roczna	^{90}Sr mBq l^{-1} zakres
Dorzecze Wisły (7) ^{a)}	2,30 ± 0,45 ^{b)}	2,39 ± 0,37 ^{b)}	2,34 ± 0,40 ^{b)} (14)	1,72–3,00
Dorzecze Odry (5)	2,22 ± 0,61	2,81 ± 0,37	2,52 ± 0,57 (10)	1,46–3,37
Jeziora (6)	3,02 ± 2,46	2,51 ± 2,03	2,76 ± 2,16 (12)	1,25–7,84
Średnia ogólna (18)	2,52 ± 1,44	2,55 ± 1,15	2,53 ± 1,28 (36)	1,25–7,84

^{a)} Liczba próbek wody

^{b)} Wartość średnia ± OS

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr oznaczono w wodach dorzecza Odry w okresie wiosennym i wynosiło ono $2,22 \text{ mBq l}^{-1}$, najwyższe jesienią również w wodach dorzecza Odry – $2,81 \text{ mBq l}^{-1}$.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w dorzeczu Wisły i Odry było na bardzo zbliżonym poziomie i wynosiło odpowiednio $2,34 \text{ mBq l}^{-1}$ i $2,52 \text{ mBq l}^{-1}$. Dla jezior średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr było nieznacznie wyższe i wynosiło $2,76 \text{ mBq l}^{-1}$ (Tabela 8.) Najmniejsze różnice w stężeniach ^{90}Sr (zakres $1,72 - 3,00 \text{ mBq l}^{-1}$) odnotowano dla wód dorzecza Wisły, największe dla wód jeziornych (zakres $1,25 - 7,84 \text{ mBq l}^{-1}$).

3.7. Analiza zależności pomiędzy zawartościami ^{137}Cs i ^{90}Sr w próbkach badanych w danym roku

Tabela 9. przedstawia średnie roczne wartości stosunku stężenia ^{90}Sr do ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły, dorzecza Odry i jezior w 2020 roku.

Stosunek średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr do ^{137}Cs w próbkach wody pobranej z rzek mieścił się w zakresie $0,50-0,92$ (w wszystkich próbkach był mniejszy od jedności). W próbkach wody pobranej z jezior stosunek średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr do ^{137}Cs mieścił się w zakresie $0,3-1,81$ (dla dwóch próbek był większy od jedności).

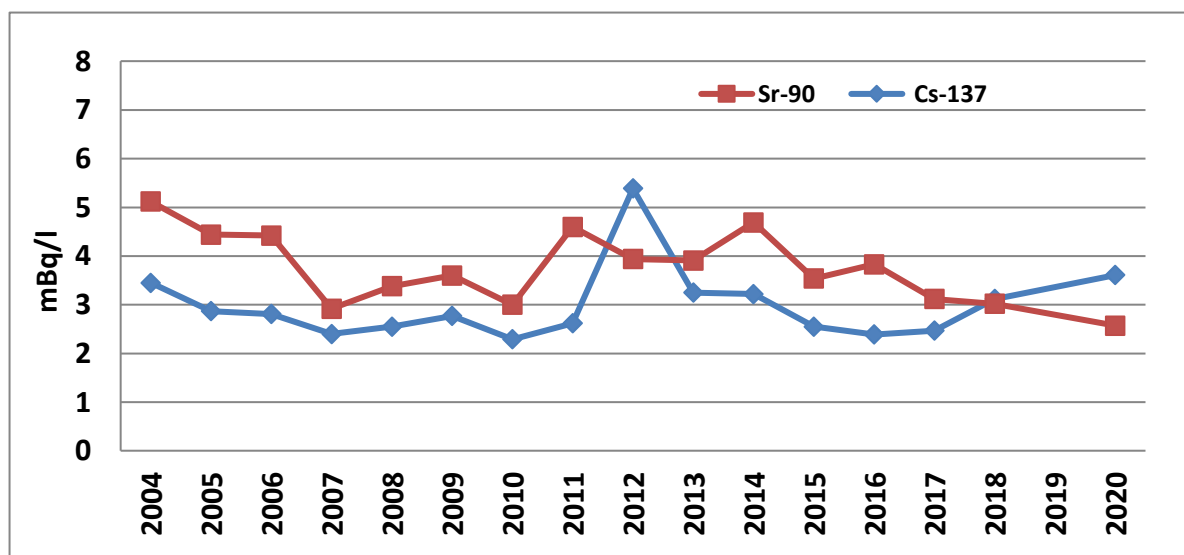
Tabela 9. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior oraz stosunek średnich rocznych stężeń w 2020 r.

Lokalizacja poboru próbek	^{137}Cs mBq l^{-1} średnia roczna	^{90}Sr mBq l^{-1} średnia roczna	$\frac{^{90}\text{Sr}}{^{137}\text{Cs}}$
Dorzecze Wisły (7)^{a)}	$3,69 \pm 1,05^{\text{b)}$ (14)	$2,34 \pm 0,40^{\text{b)}$ (14)	0,63
Dorzecze Odry (5)	$4,21 \pm 1,10$ (10)	$2,52 \pm 0,57$ (10)	0,60
Jeziora (6)	$3,00 \pm 1,22$ (12)	$2,76 \pm 2,16$ (12)	0,92
Średnia ogólna (18)	$3,61 \pm 1,19$ (36)	$2,53 \pm 1,28$ (36)	0,70

^{a)} Liczba próbek wody

^{b)} Wartość średnia \pm Odchylenie Standardowe (OS)

Rysunek 2 przedstawia czasowy przebieg średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach rzek i jezior w latach 2004 – 2020. Podane wartości są średnimi arytmetycznymi z oznaczeń poszczególnych radionuklidów w próbkach wody pobranych w kolejnych latach monitoringu. Najwyższy średni poziom stężeń promieniotwórczych badanych radionuklidów zanotowano w pierwszym roku obserwacji. W kolejnych latach średni poziom ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach nieznacznie ulegał zmianom – pozostając na niskim poziomie. Zawartość ^{90}Sr w wodach była na ogół wyższa niż zawartość ^{137}Cs . Wyjątkiem był rok 2012, 2018 i 2020, w którym to ilość ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach wynosiła odpowiednio: 3,61 mBq l⁻¹ i 2,53 mBq l⁻¹. Należy jednak zauważyć, że najniższe wartości rocznych średnich stężeń promieniotwórczych dla obu radionuklidów uzyskano w latach 2007 i 2010, gdzie miały miejsce wiosenne powodzie w naszym kraju. Możemy zatem przypuszczać, że duże masy wody spowodowały rozcieńczenie oznaczanych izotopów. To przypuszczenie potwierdzają również wyższe stężenia ^{137}Cs i ^{90}Sr uzyskane w 2011 i 2012 roku, gdy pobór prób odbywał się przy niskich i bardzo niskich poziomach wód. Od 2014 roku obserwujemy spadek zawartości ^{90}Sr w badanych wodach. Natomiast stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs utrzymuje się na tym podobnym poziomie biorąc pod uwagę błąd oznaczenia wynoszący ok. 15%. Szczególnie jest to widoczne dla próbek pobieranych w ostatnich pięciu latach.



Rys. 2. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach rzek i jezior w Polsce w latach 2004 – 2020

4. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs , ^{238}Pu I $^{239,240}\text{Pu}$ W ODSADACH DENNYCH POBRANYCH W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2020 ROKU

4.1. Ocena zawartości ^{137}Cs w osadach dennych badanych rzek z uwzględnieniem podziału na dorzecza

Tabela 10. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{137}Cs , wiosna Bq kg^{-1}	^{137}Cs , jesień, Bq kg^{-1}	^{137}Cs , średnia roczna Bq kg^{-1}
DORZECZE WISŁY				
1.	Wisła Kraków Tynec	$1,96 \pm 0,11^{\text{a}}$	$0,44 \pm 0,04^{\text{a}}$	$1,20 \pm 1,07^{\text{b}}$
2.	Wisła Annapol	$0,45 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,04$	$0,38 \pm 0,11$
3.	Wisła Warszawa	$6,00 \pm 0,29$	$3,69 \pm 0,21$	$4,85 \pm 1,63$
4.	Wisła Płock	$0,33 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,06$
5.	Wisła Kieźmark	$1,88 \pm 0,10$	$1,26 \pm 0,07$	$1,57 \pm 0,44$
6.	Narew Pułtusk	$3,64 \pm 0,16$	$3,49 \pm 0,18$	$3,57 \pm 0,11$
7.	Bug Wyszków	$0,56 \pm 0,05$	$0,44 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,08$
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	$10,04 \pm 0,48$	$20,69 \pm 2,45$	$15,37 \pm 7,53$
9.	Odra Wrocław	$0,40 \pm 0,04$	$0,53 \pm 0,05$	$0,47 \pm 0,09$
10.	Odra Głogów	$1,64 \pm 0,21$	$0,55 \pm 0,07$	$1,10 \pm 0,77$
11.	Odra Krajnik	$0,58 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,05$	$0,46 \pm 0,18$
12.	Warta Poznań	$0,57 \pm 0,07$	$0,55 \pm 0,05$	$0,56 \pm 0,01$

^{a)}Wartość \pm CWN przy poziomie ufności 95%.

^{b)}Wartość średnia \pm Odchylenie Standardowe (OS)

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych Wisły, Odry ich dopływów w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu przedstawiono w Tabeli 10.

Najniższe stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs było oznaczone zarówno wiosną jak i jesienią w osadzie pobranym z Wisły w Płocku i wynosiło odpowiednio $0,33$ i $0,25 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze tego izotopu zawierały się w granicach od 0,29 Bq kg⁻¹ do 15,37 Bq kg⁻¹ i odnosiły się odpowiednio do osadów pobranych na Wiśle w Płocku i na Odrze w Chałupkach. Zawartości ¹³⁷Cs otrzymywane dla większości punktów wiosną są wyższe niż jesienią. Tendencja ta jest obserwowana od wielu lat.

Najwyższe stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs były oznaczone jesienią w osadzie pobranym z Odry w Chałupkach (20,69 Bq kg⁻¹). Pomimo, że jest kilkakrotnie wyższe od najniższych wartości przedstawionych w tabeli pozostają jednak na niskim poziomie i nie odbiegają od wyników otrzymywanych w poprzednich latach. Sporadycznie otrzymywane podwyższone wartości dla pojedynczych pomiarów mogą wynikać z różnic w składzie osadów czasowo nanoszonych w miejscach poboru próbek (od typowo piaszczystych do ilasto gliniastych).

4.2. Ocena zawartości ²³⁸Pu i ^{239,240}Pu w osadach dennych badanych rzek z uwzględnieniem podziału na dorzecza

W Tabeli 11. przedstawiono stężenie promieniotwórcze ^{239,240}Pu w osadach dennych pobranych w okresie wiosennym i jesiennym w dorzeczu Wisły i Odry oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze powyższych izotopów.

Najniższe stężenia promieniotwórcze ^{239,240}Pu były oznaczone jesienią w osadzie pobranym z Wisły w Warszawie (3,00 mBq kg⁻¹). Najwyższe zaś w osadzie z Odry pobranym również jesienią w Chałupkach (87,65 mBq kg⁻¹). Wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{239,240}Pu w osadach dennych zawierają się w granicach od 4,17 mBq/kg w osadzie z Odry (Wrocław) do 79,93 mBq kg⁻¹ również w osadzie z Odry (Chałupki).

Stężenie promieniotwórcze ²³⁸Pu w osadach dennych (podobnie jak w roku ubiegłym) było w większości przypadków mniejsze od granicy detekcji (2 mBq kg⁻¹). W przypadku dorzeczy Wisły i Odry ²³⁸Pu został oznaczony w 5 z pośród 24 pobranych próbek osadów, a były to osady pobrane wiosną:

- z Wisły w Wyszku i wynosił 2,54 ± 0,83 mBq kg⁻¹,
- z Narwi w Pułtusku i wynosił 3,31 ± 1,32 mBq kg⁻¹,
- z Odry w Chałupkach i wynosił 2,45 ± 0,87 mBq kg⁻¹

oraz jesienią:

- z Wisły w Warszawie i wynosił 2,57 ± 0,55 mBq kg⁻¹,

- z Odry w Chałupkach i wynosił $2,30 \pm 0,49$ mBq kg⁻¹.

Tabela 11. Stężenie promieniotwórcze ^{239,240}Pu w osadach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{239,240} Pu wiosna mBq kg ⁻¹	^{239,240} Pu jesień mBq kg ⁻¹	^{239,240} Pu średnia roczna mBq kg ⁻¹
DORZECZE WISŁY				
1.	Wisła Kraków Tynec	15,81 ± 2,59 ^{a)}	3,00 ± 1,29 ^{a)}	9,41 ± 9,06 ^{b)}
2.	Wisła Annopol	10,50 ± 2,25	9,38 ± 2,36	9,94 ± 0,76
3.	Wisła Warszawa	62,37 ± 4,09	49,17 ± 3,63	55,77 ± 9,33
4.	Wisła Płock	5,12 ± 2,25	4,73 ± 1,74	4,93 ± 0,28
5.	Wisła Kieźmark	13,13 ± 3,03	5,11 ± 1,45	9,12 ± 5,67
6.	Narew Pułtusk	22,46 ± 3,29	8,77 ± 2,65	15,62 ± 9,68
7.	Bug Wyszków	4,10 ± 1,8	7,58 ± 2,12	5,84 ± 2,46
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	72,2 ± 4,9	87,65 ± 5,27	79,93 ± 10,92
9.	Odra Wrocław	3,98 ± 1,76	4,36 ± 1,75	4,17 ± 0,27
10.	Odra Głogów	20,88 ± 2,59	3,90 ± 1,37	15,39 ± 7,76
11.	Odra Krajnik	4,09 ± 1,05	5,39 ± 1,50	4,74 ± 0,92
12.	Warta Poznań	7,74 ± 2,17	4,55 ± 1,99	6,15 ± 2,26

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 68%.

^{b)}Wartość średnia ± OS

4.3. Ocena zawartości ¹³⁷Cs w osadach dennych badanych jezior

Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs w osadach dennych jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu przedstawiono w Tabeli 12.

Stężenia oznaczanego izotopu zawierały się w granicach od 0,72 Bq kg⁻¹ w osadzie pobranym wiosną z jeziora Wigry do 64,86 Bq/kg w osadzie pobranym jesienią z jeziora Rogóźno. Najniższe średnie roczne stężenie ¹³⁷Cs (0,91 Bq kg⁻¹) było oznaczone w osadach z

jeziora Wielkie Partęczyny, a najwyższe ($57,27 \text{ Bq kg}^{-1}$) w osadach z jeziora Rogóźno. Z wieloletnich obserwacji wynika, że dla jeziora Rogóźno charakterystyczne są większe wartości stężenia promieniotwórczo ^{137}Cs . Wpływ na poziom badanych pierwiastków może mieć ilość i rodzaj cieków wodnych wpływających do jeziora tym bardziej, że jezioro Rogóźno nie jest jeziorem przepływowym. Jednocześnie jest pochodzenia krasowego, a takie jeziora często charakteryzują się obecnością osadów nieprzepuszczalnych. Mogą być to powody kumulacji badanych nuklidów.

Tabela 12. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	^{137}Cs , wiosna Bq kg^{-1}	^{137}Cs , jesień, Bq kg^{-1}	^{137}Cs , średnia roczna Bq kg^{-1}
1.	Wigry Stary Folwark	$0,72 \pm 0,05^{\text{a}}$	$4,18 \pm 0,20^{\text{a}}$	$2,45 \pm 2,45^{\text{b}}$
2.	Wadąg Myki	$1,84 \pm 0,15$	$1,75 \pm 0,11$	$1,80 \pm 0,06$
3.	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$1,08 \pm 0,07$	$0,74 \pm 0,05$	$0,91 \pm 0,24$
4.	Drawsko Stare Drawsko	$1,38 \pm 0,09$	$1,31 \pm 0,13$	$1,35 \pm 0,05$
5.	Niesłysz Niesulice	$4,90 \pm 0,20$	$5,25 \pm 0,23$	$5,08 \pm 0,25$
6.	Rogóźno Rogóźno	$49,67 \pm 1,70$	$64,86 \pm 3,29$	$57,27 \pm 10,74$

^{a)}Wartość \pm CWN przy poziomie ufności 95%.

^{b)}Wartość średnia \pm Odchylenie Standardowe (OS)

4.4. Ocena zawartości ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych badanych jezior

Tabela 13. przedstawia stężenia promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych pobranych w okresie wiosennym i jesiennym w jeziorach oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze powyższych izotopów.

Najniższe stężenie $^{239,240}\text{Pu}$ ($3,36 \text{ mBq kg}^{-1}$) było oznaczone jesienią w osadzie pobranym z jeziora Drawsko, a największe $748,3$ i $530,2 \text{ mBq kg}^{-1}$ odpowiednio w osadzie wiosennym i jesiennym z jeziora Rogóźno. Charakterystyczne większe wartości stężenia promieniotwórczego oznaczanych izotopów (szczególnie izotopów oznaczanych w osadach) prawdopodobnie związane są z pochodzeniem tego jeziora, co zostało omówione w punkcie 4.3.

Tabela 13. Stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2020 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	$^{239,240}\text{Pu}$ wiosna mBq kg ⁻¹	$^{239,240}\text{Pu}$ jesień mBq kg ⁻¹	$^{239,240}\text{Pu}$ średnia roczna mBq kg ⁻¹
1.	Wigry Stary Folwark	4,61 ± 1,89 ^{a)}	4,89 ± 1,47 ^{b)}	4,75 ± 0,20 ^{b)}
2.	Wadąg Myki	4,95 ± 1,51	7,73 ± 2,00	6,35 ± 1,98
3.	Wielkie Parteczyny Parteczyny	3,48 ± 1,64	7,46 ± 2,00	5,47 ± 2,81
4.	Drawsko Stare Drawsko	3,88 ± 1,53	3,36 ± 1,30	3,62 ± 0,37
5.	Niesłysz Niesulice	15,38 ± 2,88	13,39 ± 2,42	14,39 ± 1,41
6.	Rogóżno Rogóżno	748,30 ± 28,1	530,20 ± 24,00	639,25 ± 154,22

^{a)}Wartość ± CWN przy poziomie ufności 68% ^{b)}Wartość średnia ± OS

Średnie roczne stężenie izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych zawiera się w granicach od 3,62 mBq kg⁻¹ w jeziorze Drawsko do 639,25 mBq kg⁻¹ w jeziorze Rogóżno.

Stężenie ^{238}Pu w osadach dennych było w większości przypadków mniejsze od granicy detekcji (2 mBq kg⁻¹). Zostało oznaczone tylko w 2 z pośród 12 próbek osadów, a były to osady pobrane wiosną i jesienią z jeziora Rogóżno i wynosiło odpowiednio: 13,40 i 10,22 mBq kg⁻¹.

4.5. Porównanie zawartości ^{137}Cs w osadach badanych rzek z zawartościami notowanymi w jeziorach

W Tabeli 14. przedstawiono średnie stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dorzecza Wisły, dorzecza Odry i w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenia promieniotwórcze i ich zakres.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs dla dorzecza Wisły, Odry i jezior wynosiło odpowiednio 1,76; 3,59 i 11,47 Bq kg⁻¹. Największe różnice w stężeniach ^{137}Cs obserwowano dla jezior od 0,72 do 64,86 Bq kg⁻¹.

Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w 2020 roku było najniższe jesienią w dorzeczu Wisły i wynosiło 1,41 Bq kg⁻¹, Najwyższą wartość oznaczono jesienią w jeziorach – 13,02 Bq kg⁻¹.

Tabela 14. Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych dorzecza Wisły, Odry i jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego izotopu w 2020 r.

Lokalizacja poboru próbek	^{137}Cs Bq kg ⁻¹ wiosna	^{137}Cs Bq kg ⁻¹ jesień	^{137}Cs Bq kg ⁻¹ średnia roczna	^{137}Cs Bq kg ⁻¹ zakres
Dorzecze Wisły (7) ^{a)}	2,12 ± 2,08 ^{b)}	1,41 ± 1,53	1,76 ± 1,79 (14)	0,30–3,69
Dorzecze Odry (5)	2,65 ± 4,16	4,53 ± 9,03	3,59 ± 6,13 (10)	0,33–20,69
Jeziora (6)	9,93 ± 19,53	13,02 ± 25,46	11,47 ± 21,69 (12)	0,72–64,86
Średnia ogólna (18)	4,83 ± 11,46	6,15 ± 15,41	5,51 ± 13,39 (36)	0,30–64,86

^{a)} Liczba próbek osadów dennych

^{b)} Wartość średnia ± OS

4.6. Porównanie zawartości ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych badanych rzek z zawartościami notowanymi w jeziorach

Tabela 15. Średnie stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych dorzecza Wisły, Odry i jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tych izotopów w 2020 r.

Lokalizacja poboru próbek	$^{239,240}\text{Pu}$ mBq kg ⁻¹ wiosna	$^{239,240}\text{Pu}$ mBq kg ⁻¹ jesień	$^{239,240}\text{Pu}$ mBq kg ⁻¹ średnia roczna	$^{239,240}\text{Pu}$ mBq kg ⁻¹ zakres
Dorzecze Wisły (7) ^{a)}	19,07 ± 20,10 ^{b)}	12,53 ± 16,32	16,32 ± 15,80	3,00–62,37
Dorzecze Odry (5)	21,76 ± 29,06	22,37 ± 36,56	22,07 ± 31,12	3,98–87,65
Jeziora (6)	130,10 ± 302,89	94,51 ± 213,47	112,30 ± 250,52	3,36–748,30
Średnia ogólna (18)	56,83 ± 176,69	16,27 ± 19,70	49,71 ± 148,49	3,00–748,30

^{a)} Liczba próbek osadów dennych

^{b)} Średnia ± OS

W Tabeli 15. przedstawiono średnie stężenia promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ dla dorzeczy Wisły i Odry oraz jezior zarówno w okresie wiosennym jak i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego izotopu i zakres.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior wynosiły odpowiednio 16,32 mBq kg⁻¹, 22,07 mBq kg⁻¹ i 112,30 mBq kg⁻¹. Największe

różnice stężeń oznaczanych izotopów występowały w jeziorach i mieściły się w zakresie od 3,36 do 748,30 mBq kg⁻¹.

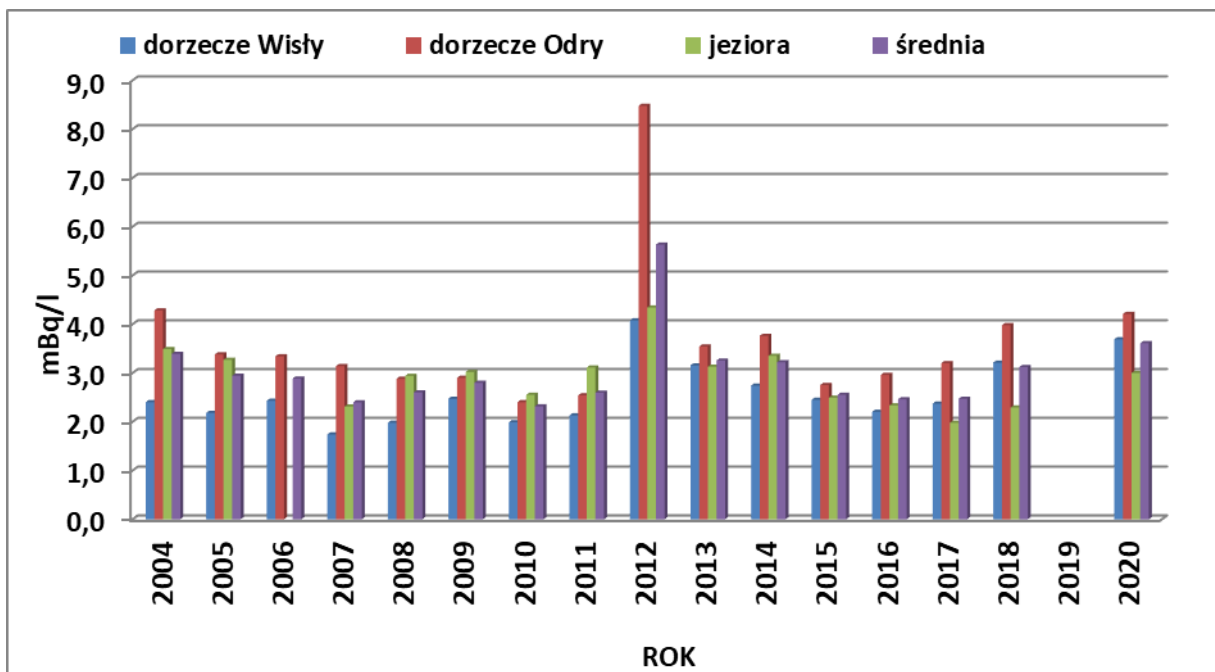
Stężenie promieniotwórcze ²³⁸Pu w osadach dennych było w większości przypadków mniejsze od granicy detekcji (2 mBq kg⁻¹). Zostało oznaczone tylko w 5 z pośród 24 próbek osadów, a były to osady pobrane wiosną w Warszawie (2,52 mBq kg⁻¹), Pułtusku (3,31 mBq kg⁻¹) i w Chałupkach (2,45 mBq kg⁻¹) oraz jesienią w Warszawie (2,57 mBq kg⁻¹) i w Chałupkach (2,30 mBq kg⁻¹)

Dla jezior stężenie ²³⁸Pu zostało oznaczone tylko w 2 z pośród 12 próbek osadów, a były to osady pobrane wiosną i jesienią z jeziora Rogóźno i wynosiło odpowiednio: 13,40 i 10,22 mBq kg⁻¹.

5. ZMIANY WARUNKÓW RADIOLOGICZNYCH NA PRZESTRZENI LAT

Zmiany warunków radiologicznych przedstawiono w układzie dorzeczy oraz ich porównanie do jezior na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych.

5.1. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w wodach rzecznych w układzie dorzeczy oraz ich porównanie do wód jeziornych



Rys. 3. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2020

Rysunek 3. przedstawia wykres obrazujący średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodzie dla dorzeczy Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w latach 2004-2020. W roku 2019 badania prowadzone były tylko dla jednego (jesiennego) poboru stąd brak wartości średnich rocznych.

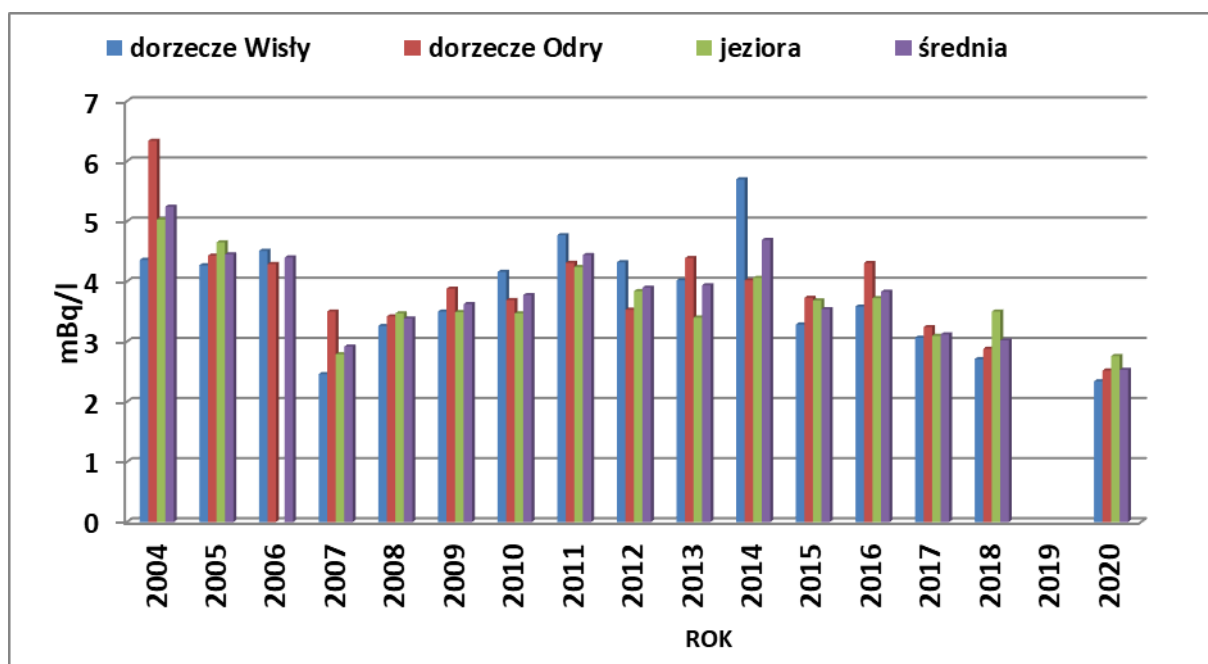
Najniższe wartość średniego rocznego stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs w latach 2004-2015 obserwujemy dla dorzecza Wisły. Natomiast od 2017 roku najniższe wartość odnotowano dla wód jeziornych. Zawartości ^{137}Cs w dorzeczu Odry i jeziorach są zazwyczaj bardziej porównywalne ze sobą. Wyjątek stanowi rok 2012, kiedy odnotowano najwyższe średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs . Prawdopodobnie było to spowodowane niskim poziomem wód, jaki miał miejsce w tym roku, mogło to być przyczyną kumulacji badanego izotopu. Szczególnie podwyższony poziom był widoczny dla dorzecza Odry.

Wpływ na podwyższenie wartości średniej miał również otrzymany wynik dla próbki osadu pobranego wiosną w Chałupkach ($40,72 \text{ mBq l}^{-1}$). Jesienią oznaczona zawartość ^{137}Cs była już dziesięciokrotnie niższa. W przedziałach czasowych 2013-2014 i 2015-2017 obserwujemy wyrównany poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs . W 2016 roku zawartość izotopu cezu w wodzie dla dorzecza Wisły i jezior była wyrównana i niższa niż w ostatnich latach. Natomiast zawartość izotopu cezu w wodzie dorzecza Odry była nieznacznie wyższa niż w 2015 roku. W roku 2018 nastąpił wzrost średnich rocznych zawartości ^{137}Cs dla dorzeczy i jezior w stosunku do trzech wcześniejszych lat. Podobna sytuacja miała miejsce w bieżącym roku. Biorąc pod uwagę ok.15% błąd oznaczenia można stwierdzić, że średnia zawartość ^{137}Cs w wodach rzek i jezior zarówno w 2020 roku jak i kilku ubiegłych latach jest na zbliżonym poziomie.

5.2. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodach rzecznych w układzie dorzeczy oraz ich porównanie do wód jeziornych

Na Rysunku 4. przedstawiono średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodzie dla dorzeczy Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej z lat 2004-2020. W roku 2019 badania prowadzone były tylko dla jednego (jesiennego) poboru stąd brak wartości średnich rocznych.

W przypadku ^{90}Sr na przestrzeni siedemnastu lat monitoringu nie widać wyraźnie powtarzających się zależności. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w poszczególnych latach dla dorzeczy Wisły i Odry jak i jezior są bardziej wyrównane niż w przypadku analogicznych średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs .

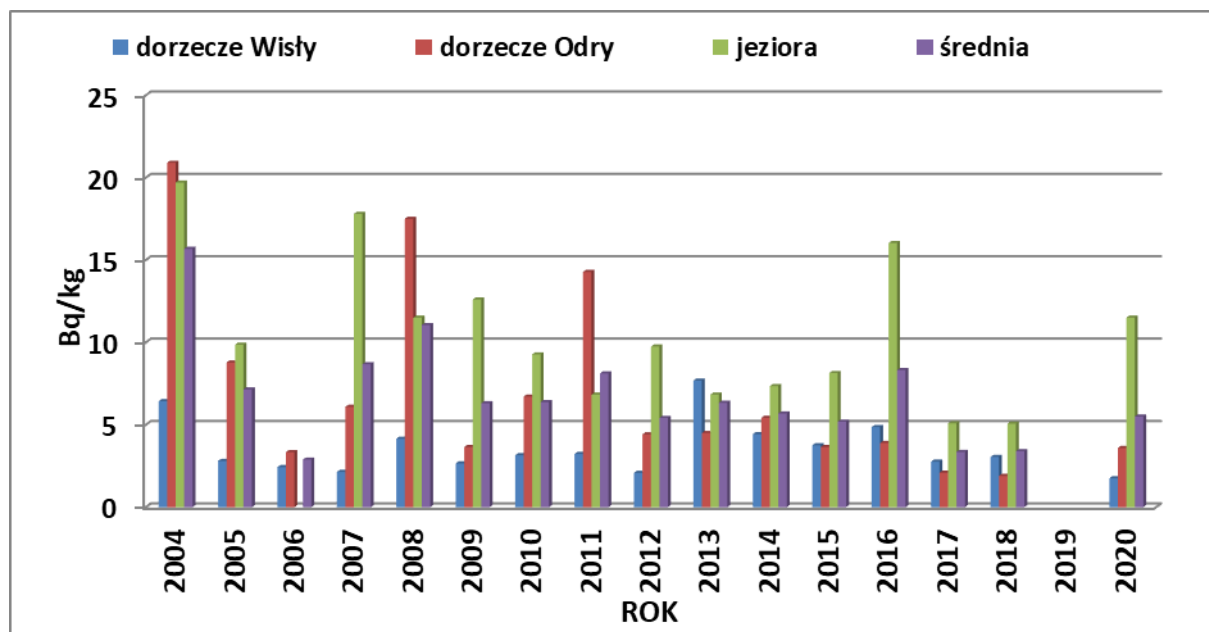


Rys. 4. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2020

Najwyższą wartość otrzymano w pierwszym roku badań ($5,2 \text{ mBq l}^{-1}$). Przez kolejne trzy lata obserwowano spadek ogólnego średniego rocznego stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr do roku 2007, w którym to roku odnotowano najniższą wartość – $2,9 \text{ mBq l}^{-1}$. Przez kolejne dziewięć lat zawartość ^{90}Sr w analizowanych wodach utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Zarejestrowane zmiany mieściły się w zakresie $1,5 \text{ mBq l}^{-1}$. Poszczególne podwyższone wartości średnich rocznych dla dorzeczy i jezior zazwyczaj spowodowane były jednokrotnym oznaczeniem wyższej zawartości ^{90}Sr w pojedynczych próbkach, które nie znajdowały potwierdzenia stabilności zmiany w kolejnych analizach. Na przykład w 2014 roku na wyższą wartość ogólnej średniej rocznej stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr dla dorzecza Wisły w stosunku do pozostałych lat, miał wpływ wynik otrzymany dla próbki osadu pobranego jesienią w Płocku. Stężenie wynosiło $16,15 \text{ mBq l}^{-1}$ i było od 3 do 5 razy wyższe od wartości uzyskanych dla próbek pobranych w innych lokalizacjach. W 2017 roku odnotowano najbardziej zbliżone wartości średniego rocznego stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior i nieznacznie niższą wartość średniej rocznej w stosunku do kilku ubiegłych lat. W roku 2018 wyniki dla dorzeczy i jezior nie były tak bardzo zbliżone jak rok wcześniej, ale wartość średniego rocznego stężenia izotopu strontu pozostała na tym samym poziomie. W bieżącym roku odnotowano nieznaczny spadek zawartości badanego izotopu zarówno dla dorzeczy jak i jezior.

5.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadach dennych rzecznych w układzie dorzeczy oraz ich porównanie do osadów jeziornych

Rysunek 5. przedstawia wykres obrazujący średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych dla dorzeczy Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w latach 2004-2020.



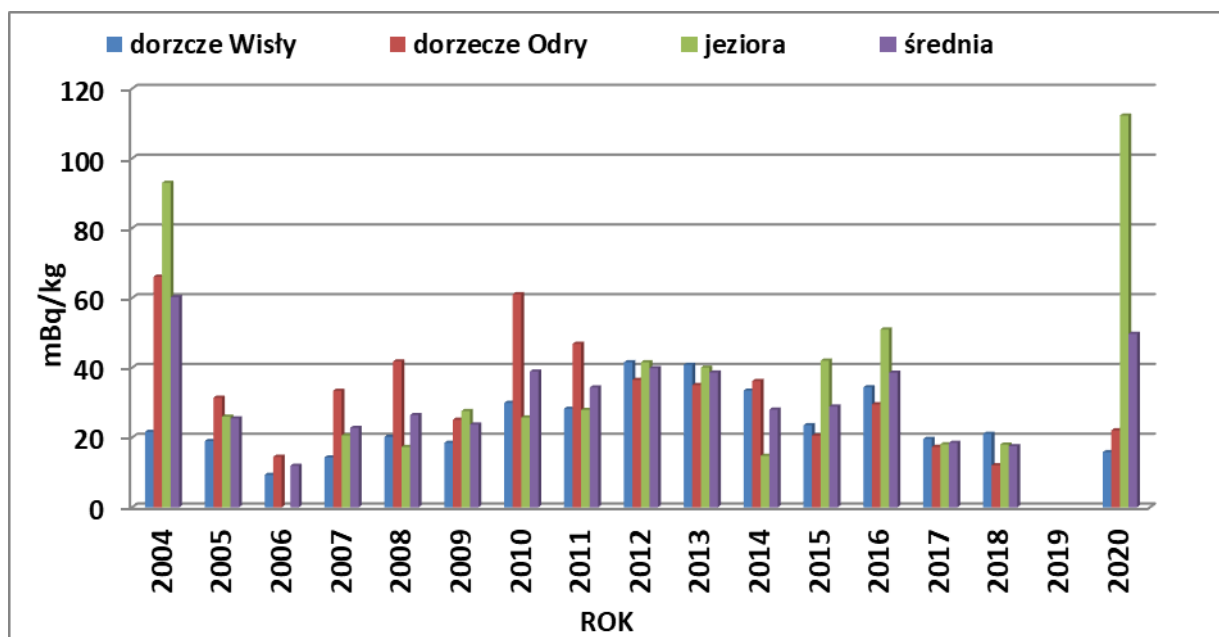
Rys. 5. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2020

W ocenie ogólnej średniej rocznej zawartości ^{137}Cs w osadach dennych pomijamy rok 2006, ponieważ w tym roku nie były monitorowane jeziora oraz rok 2019, ponieważ w tym roku przeprowadzono tylko pobór jesienny.

Najwyższe ogólne średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych zanotowano w roku 2004. Średnie roczne stężenia wynosiły wówczas odpowiednio: dla dorzecza Wisły – $6,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, dla dorzecza Odry – $20,9 \text{ Bq kg}^{-1}$ i dla jezior – $19,7 \text{ Bq kg}^{-1}$. Najbardziej zbliżone średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs zanotowano jeszcze kilkakrotnie; dla jezior w roku 2007 ($12,6 \text{ Bq kg}^{-1}$) i 2016 ($16,0 \text{ Bq kg}^{-1}$), dla dorzecza Wisły w 2013 ($7,7 \text{ Bq kg}^{-1}$), a dla dorzecza Odry w roku 2008 ($17,5 \text{ Bq kg}^{-1}$). W większości przypadków w latach monitoringu zawartość ^{137}Cs była znacznie niższa dla dorzecza Wisły niż dorzecza Odry i jezior. W roku 2013 nie obserwuje się tej zależności. W tym roku na wyższą wartość średniej rocznej stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs dla dorzecza Wisły w stosunku do pozostałych lat, miał wpływ wynik otrzymany dla próbki osadu pobranego wiosną w Krakowie Tyńcu ($63,75 \text{ Bq kg}^{-1}$). Wszystkie wartości średnich rocznych stężeń

^{137}Cs są najbardziej zbliżone w roku 2014. Natomiast ogólna średnia roczna zawartości ^{137}Cs w osadach dennych osiągnęła najniższą, niemal identyczną wartość w latach 2017, 2018 i wynosiła odpowiednio: $3,35 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $3,40 \text{ Bq kg}^{-1}$ (z pominięciem roku 2006, w którym nie były monitorowane jeziora). W roku 2020 uzyskano znacznie wyższą wartość średnią dla osadów jeziornych niż w latach 2017 i 2018. Wpływ na taką wartość miały wyniki uzyskane zarówno wiosną jak i jesienią dla jeziora Rogóźno ($49,67 \pm 1,70$ i $64,86 \pm 1,10 \text{ Bq kg}^{-1}$)

5.4. Analiza zawartości ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych rzecznych w układzie dorzeczy oraz ich porównanie do osadów jeziornych



Rys. 6. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2020.

Rysunek 6. przedstawia wykres obrazujący średnie roczne stężenia promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych dla dorzeczy Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w latach 2004-2020.

Podobnie jak w przypadku izotopu ^{137}Cs w ocenie ogólnej średniej rocznej zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych nie bierzemy pod uwagę roku 2006, w którym nie były monitorowane jeziora oraz roku 2019, ponieważ w tym roku przeprowadzono tylko pobór jesienny.

Z pominięciem pierwszego roku badań i roku 2006 widzimy, że zmiany zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ na przestrzeni czternastu lat obserwacji mieszczą się w zakresie 20 mBq kg^{-1} .

Najwyższe średnie stężenia $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych obserwowano w roku 2004 i 2020 dla jezior ($93,0 \text{ mBq kg}^{-1}$ i $112,3 \text{ mBq kg}^{-1}$) i w 2010 dla dorzecza Odry ($61,1 \text{ mBq kg}^{-1}$).

Z obserwacji średnich rocznych zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych wynika, że w latach 2012 i 2013 poziom jego stężeń w dorzeczach Wisły, Odry i w jeziorach jest najbardziej zbliżony i wynosi ok. 40 mBq/kg. Taka sytuacja miała miejsce jeszcze w roku 2017 i 2018, z tym, że wartości średnich rocznych dla dorzeczy i jezior były dwukrotnie niższe i wynosiły ok. 20 mBq kg⁻¹. W roku 2014 i 2015 odnotowano spadek ogólnej rocznej zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w stosunku do kilku wcześniejszych lat (2010-2013). Pomimo podwyższonej zawartości izotopów plutonu w 2015 roku w jeziorach wartość ogólnej średniej rocznej pozostała na tym samym poziomie co w roku 2014 (ok. 28 mBq kg⁻¹).

W roku 2016 zaobserwowaliśmy niewielki wzrost stężeń izotopów plutonu w dorzeczach Wisły, Odry i w jeziorach w stosunku do roku 2015. Odnotowane wyższe wartości nie świadczą o zmianie warunków radiologicznych obserwowanych od wielu lat, są wynikiem oznaczenia większej ilości $^{239,240}\text{Pu}$ dla pojedynczych próbek (Tabela 11.). Kilkakrotnie większe wartości mogą jednak sugerować zmianę składu osadów nanoszonych w miejscach poboru prób w poszczególnych okresach badań

Osady denne charakteryzują się bardzo niskimi zawartościami izotopów plutonu. Na wartość oznaczonego stężenia duży wpływ ma skład granulometryczny (typ) osadu, który może zmieniać się w poszczególnych latach wskutek np. prądów rzecznych lub nawet niewielkich różnic miejsc poboru próbki. Niskie stężenia obarczone są również większym błędem pomiarowym.

W roku 2017 i 2018 odnotowano najniższe wartość ogólnej średniej rocznej izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych, a wynosiły one odpowiednio: 18,47 mBq kg⁻¹ i 18,61 mBq kg⁻¹ (z pominięciem roku 2006, w którym nie były monitorowane jeziora).

W roku 2020 uzyskano najwyższą wartość średnią na przestrzeni lat dla jezior. Wpływ na taką wartość (podobnie jak w przypadku cezu) miały wyniki uzyskane zarówno wiosną jak i jesienią dla jeziora Rogóźno.

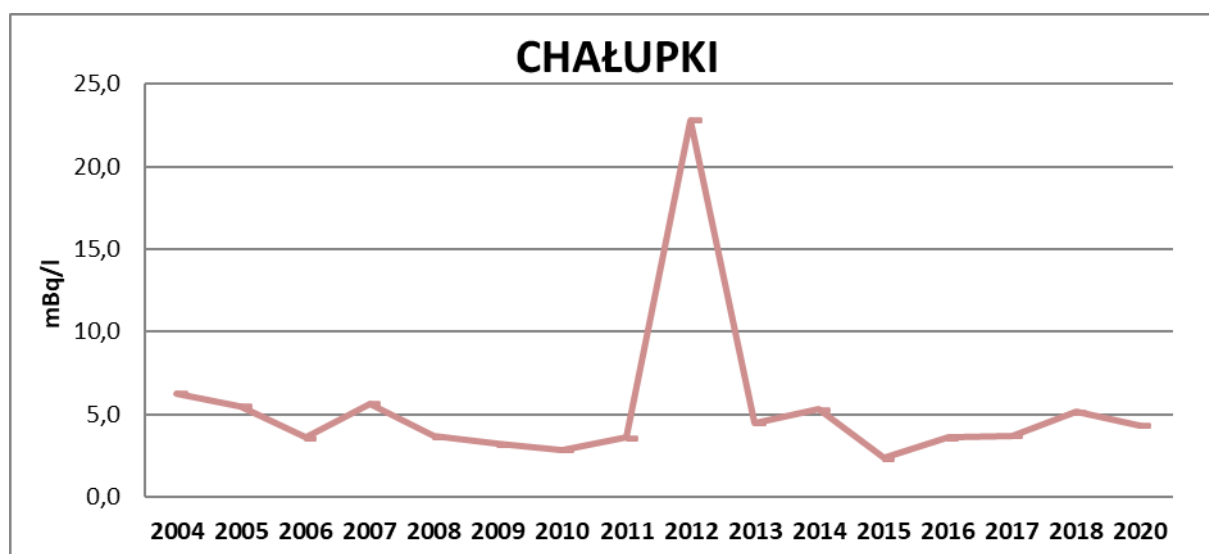
6. ZMIANY WARUNKÓW RADIOLOGICZNYCH NA PRZESTRZENI LAT W WYBRANYCH PUNKTACH BADAWCZYCH

Zmiany warunków radiologicznych na przestrzeni lat przedstawiono dla czterech wybranych punktów pomiarowych zlokalizowanych: na Odrze (Chałupki, Wrocław, Głogów, Krajnik) oraz na dwóch jeziorach Wigry i Wadąg. Przedstawione w rozdziale wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Aby była możliwość porównania wartości parametrów w poszczególnych latach w danym punkcie poboru, ale również pomiędzy poszczególnymi punktami na wykresach została zachowana ta sama skala dla poszczególnych izotopów.

6.1. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodach na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych

6.1.1. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Odry w Chałupkach

Rysunek 7. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach dorzecza Odry dla punktu pomiarowego w Chałupkach w latach 2004 – 2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.



Rys. 7. Zawartość ^{137}Cs w wodach Odry pobranej w Chałupkach w latach 2004-2020

Średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs w wodzie pobieranej w Chałupkach przez wszystkie lata obserwacji był dosyć wyrównany. Jedynie w roku 2012 zanotowano niewielki wzrost zawartości ^{137}Cs . Podwyższona wartość średniej rocznej ^{137}Cs w wodzie spowodowana została oznaczonym stężeniem promieniotwórczego tego izotopu w próbce wiosennej ($40,72 \text{ mBq l}^{-1}$), które można jedynie tłumaczyć czasowym wpływem wód innego

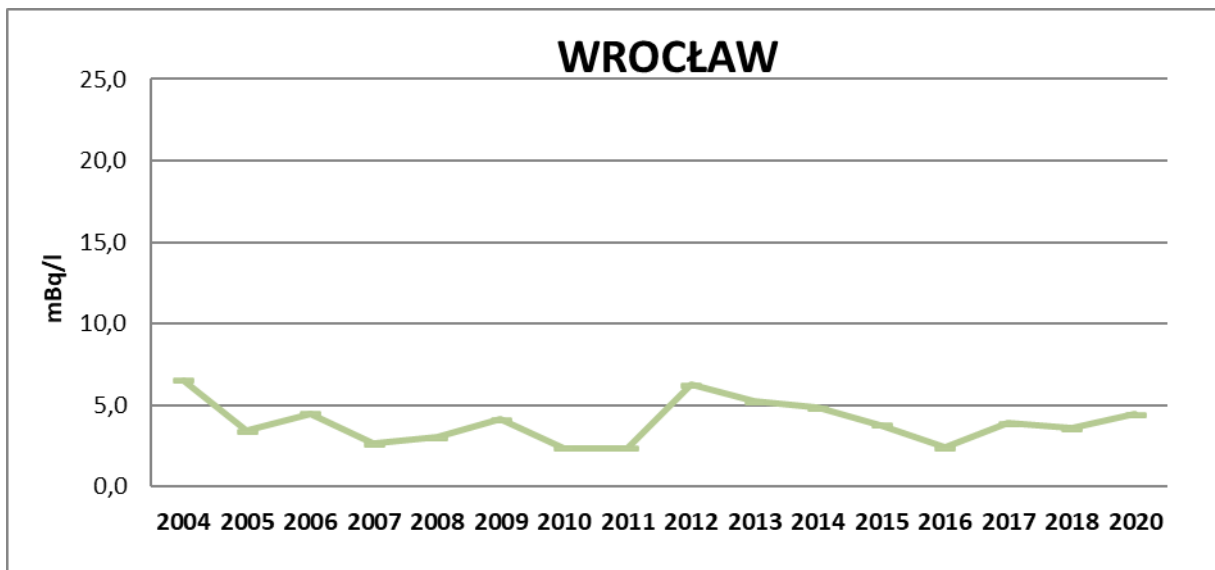
pochodzenia w to miejsce. Trwałości tej zmiany nie potwierdziły badania jesienne, w których oznaczone stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodzie wynosiło $4,95 \text{ mBq l}^{-1}$.

Należy jednak podkreślić, że pomimo odnotowanej zmiany zawartość ^{137}Cs w wodzie z Odry w Chałupkach pozostaje na niskim poziomie. Potwierdza to również wynik uzyskany w roku bieżącym – $4,34 \text{ mBq l}^{-1}$.

6.1.2. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Odry we Wrocławiu

Rysunek 8. Przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach Odry pobranej we Wrocławiu w latach 2004-2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

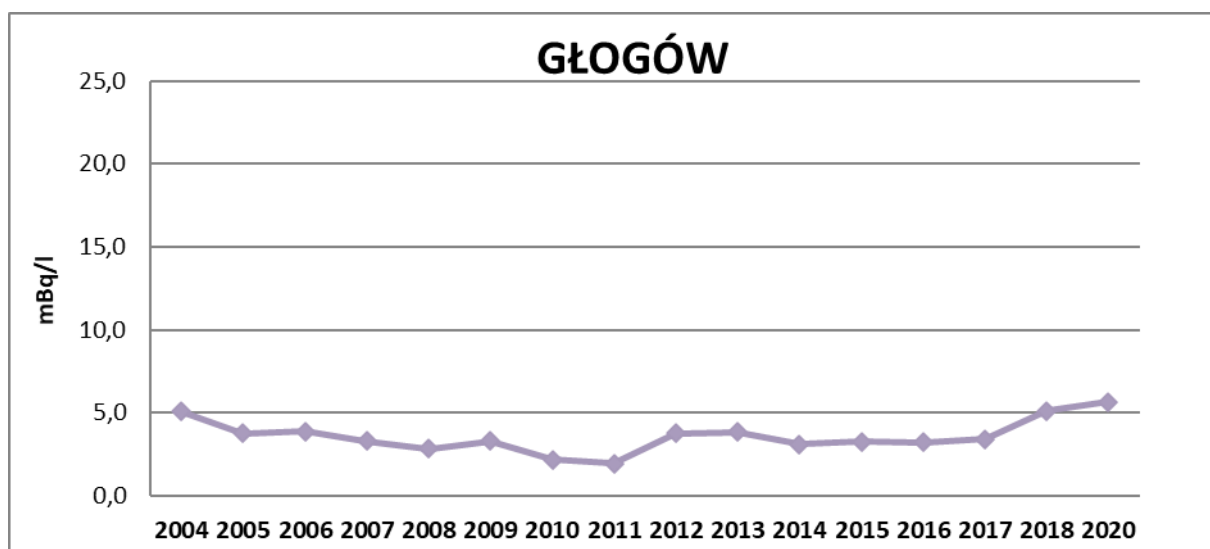
Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze izotopu ^{137}Cs mieści się w wąskim zakresie od $2,4$ (rok 2010, 2011 i 2016) do $6,5 \text{ mBq l}^{-1}$ (rok 2004). Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{137}Cs w wodzie z Odry we Wrocławiu pozostaje na niskim, nieznacznie zmieniającym się poziomie. W bieżącym roku wynosi $4,4 \text{ mBq l}^{-1}$.



Rys. 8. Zawartość ^{137}Cs w wodach Odry pobranej we Wrocławiu w latach 2004-2020

6.1.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Odry w Głogowie

Średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs w wodzie pobieranej w Odrze w Głogowie w lata 2004-2020 był wyrównany (Rysunek 9.). Średnia roczna zawartość ^{137}Cs w wodzie pobieranej w Głogowie w latach 2004-2020 mieści się w zakresie od $1,9$ do $5,1 \text{ mBq l}^{-1}$.

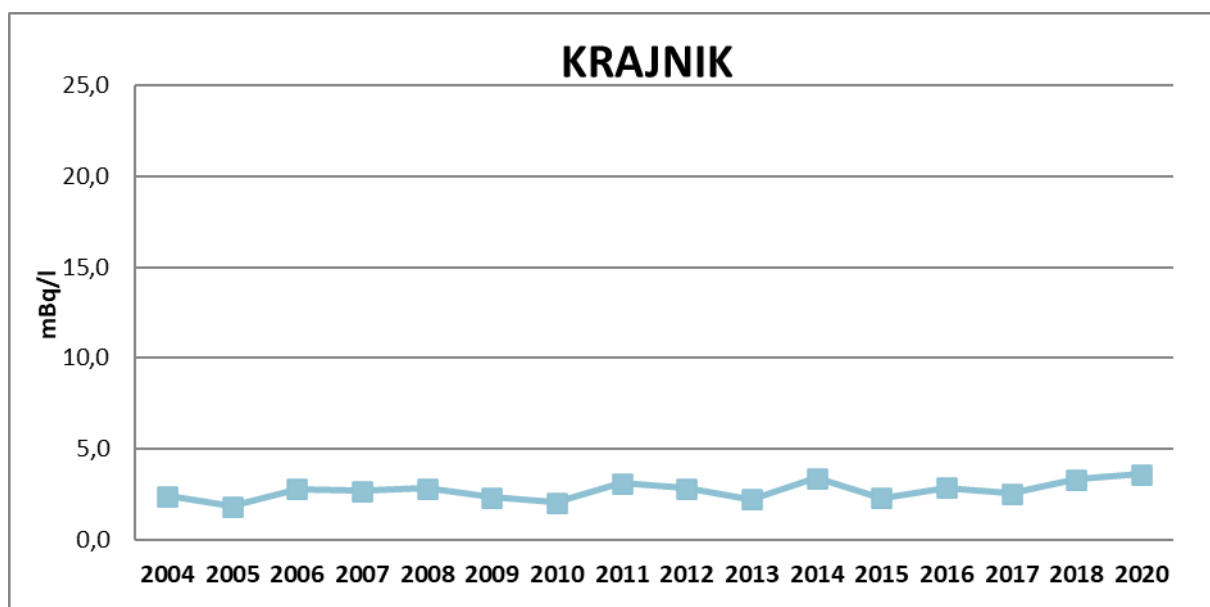


Rys. 9. Zawartość ^{137}Cs w wodach Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020

Najwyższe wartości zanotowano w latach 2004, 2018 i 2020, a wynosiły one odpowiednio: 5,1, 5,1 i 5,6 mBq $^{-1}$

6.1.4. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Odry w Krajniku

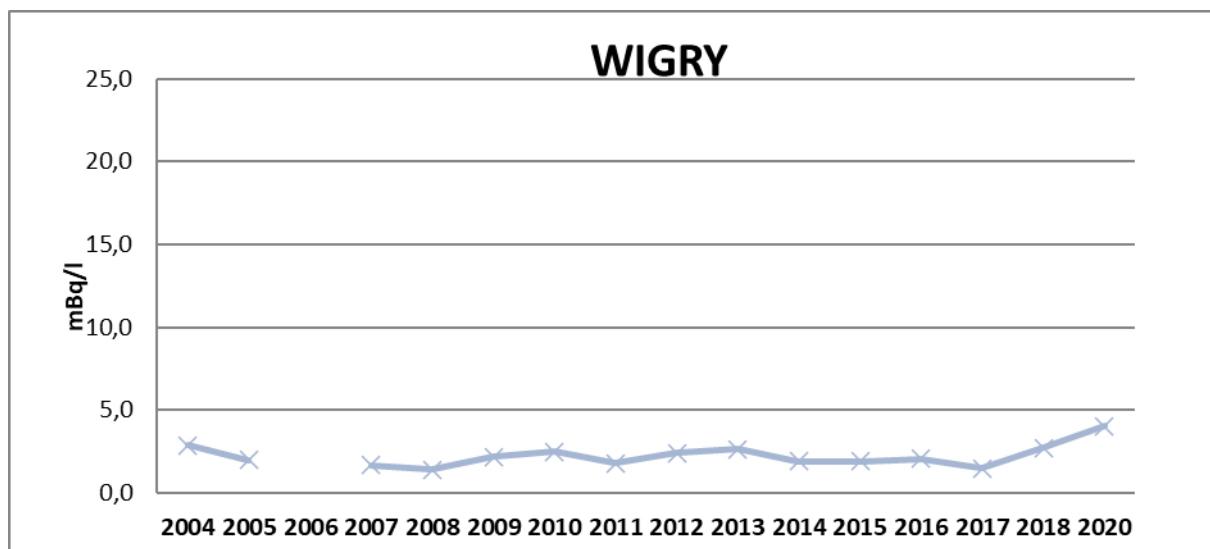
W przypadku punktu poboru w Krajniku występują nieznaczne zmiany zawartości izotopu ^{137}Cs w wodzie poszczególnych latach obserwacji (Rysunek 10.). Zmiany te mieszczą się w granicach od 1,8 (rok 2005) do 3,6 mBq $^{-1}$ (rok 2020).



Rys. 10. Zawartość ^{137}Cs w wodach Odry pobranej w Krajniku w latach 2004-2020

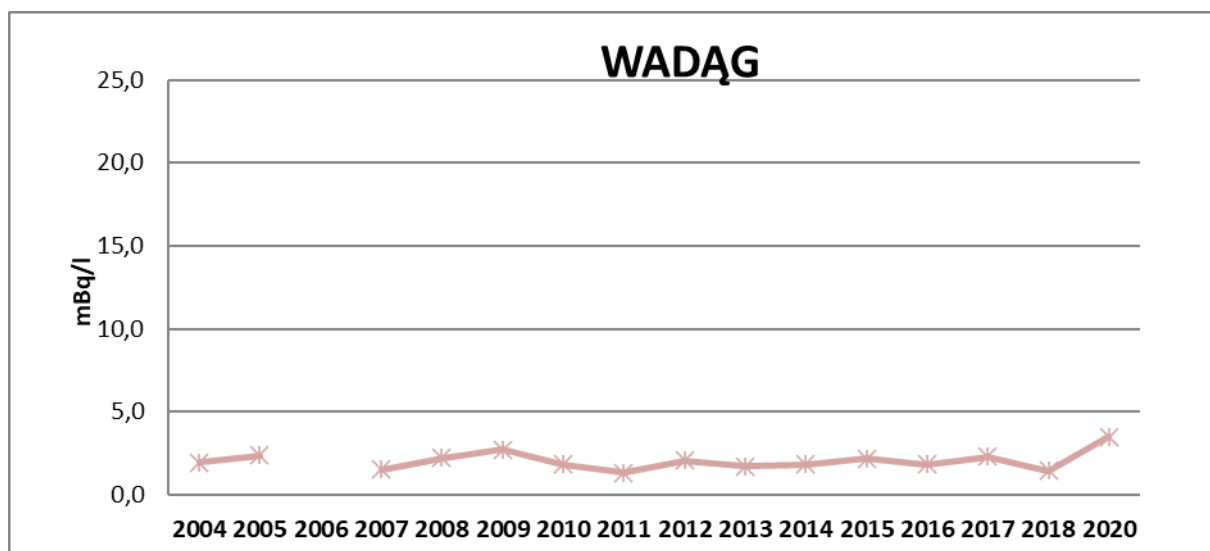
6.1.5. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z jeziora Wigry

Z przedstawionej na Rysunku 11. zależności wynika, że w przeciągu kilkunastu lat zmiany zawartości ^{137}Cs w wodach były nieznaczne. Zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. $2,5 \text{ mBq l}^{-1}$. Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{137}Cs w wodach jeziora Wigry jest niezmienna od 16 lat i jest na niskim poziomie.



Rys. 11. Zawartość ^{137}Cs w wodzie z jeziora Wigry w latach 2004-2020

6.1.6. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z jeziora Wadąg



Rys. 12. Zawartość ^{137}Cs w wodzie z jeziora Wadąg w latach 2004-2020

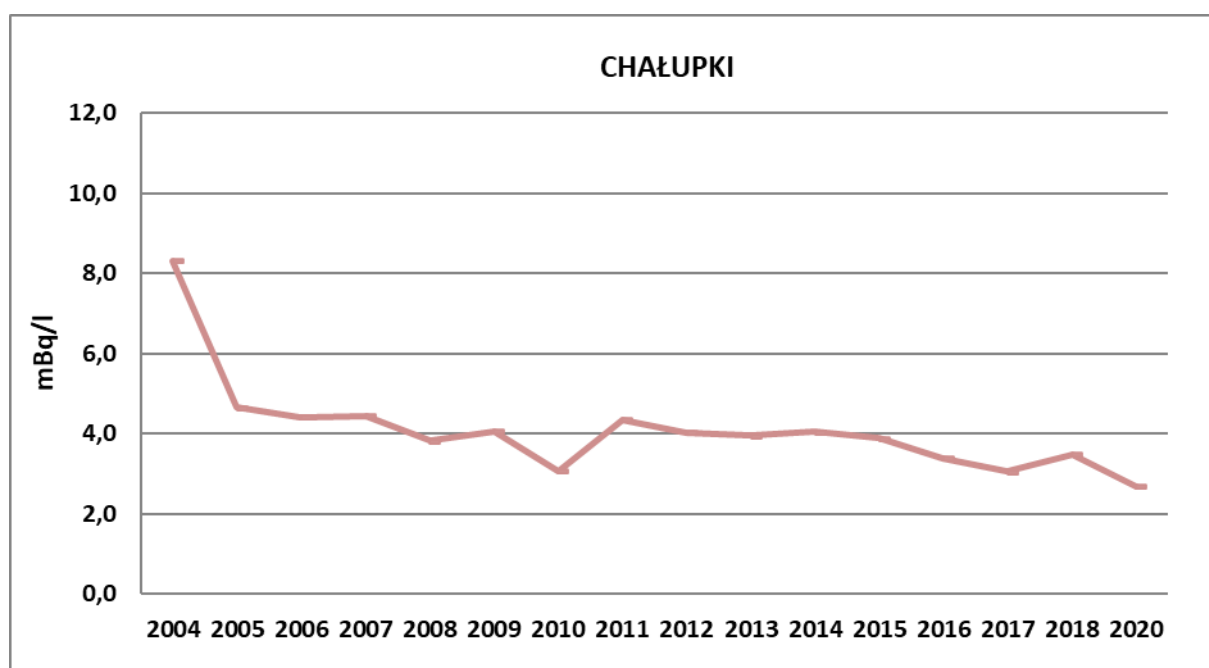
Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach jeziora Wadąg w latach 2004 – 2020 przedstawiono na Rysunku 12.

Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu wszystkich lat obserwacji zmiany zawartości ^{137}Cs w wodach były nieznaczne. Najniższą zawartość uzyskano w roku 2018 ($1,4 \text{ mBq l}^{-1}$) najwyższą zaś w roku bieżącym – $3,5 \text{ mBq l}^{-1}$. Zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. 2 mBq l^{-1} . Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{137}Cs w wodach jeziora Wadąg jest niezmienna od 16 lat i jest na niskim poziomie.

6.2. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodach na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych

6.2.1. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Odry w Chałupkach

Rysunek 13. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach Odry pobranej w Chałupkach w latach 2004-2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

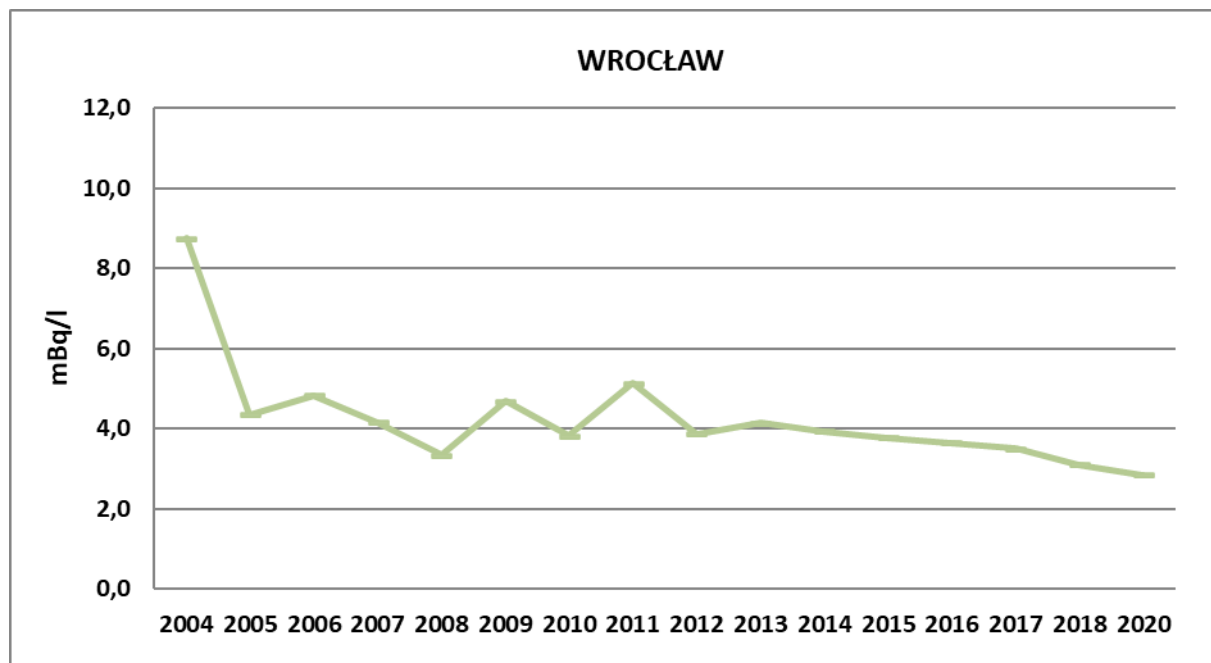


Rys. 13. Zawartość ^{90}Sr w wodach Odry pobranej w Chałupkach w latach 2004-2020

Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr mieści się w zakresie od $3,1$ (rok 2017) do $8,3 \text{ mBq l}^{-1}$ (rok 2004). Można przyjąć, że stężenie ^{90}Sr w latach 2004-2020 przy nieznacznych fluktuacjach pozostaje na wyrównanym poziomie z tendencją spadkową od roku 2014.

6.2.2. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Odry we Wrocławiu

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach Odry pobranej we Wrocławiu w latach 2004-2020. przedstawiono na Rysunku 14. Podane wartości są średnimi rocznymi w poszczególnych latach.

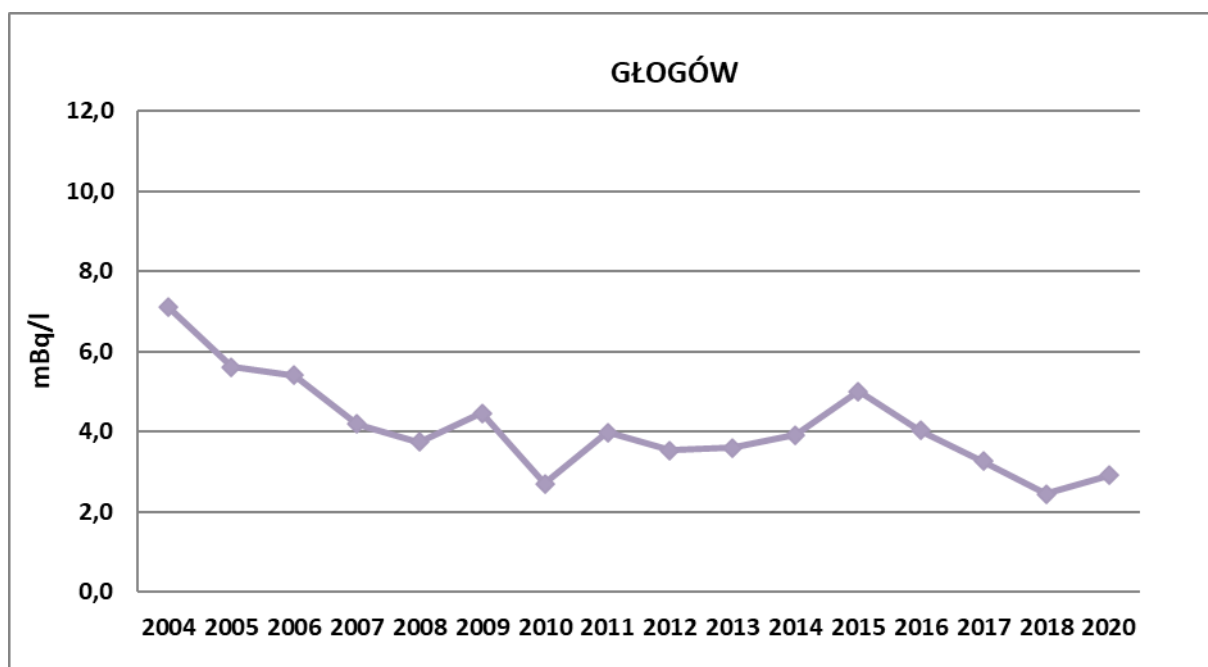


Rys. 14. Zawartość ^{90}Sr w wodach Odry pobranej we Wrocławiu w latach 2004-2020

Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu szesnastu lat zmiany zawartości ^{90}Sr w wodach były nieznaczne. Z wyjątkiem pierwszego roku badań, w którym odnotowano stężenie promieniotwórczych ^{90}Sr o wartości 8,8 mBq/l. Poza tym, zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. 2 mBq $^{-1}$. Od 2013 roku obserwujemy ciągły, nieznaczny spadek zawartości badanego izotopu. Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{90}Sr w wodach z Odry w badanym punkcie jest niezmienna od kilkunastu lat i jest na niskim poziomie. W bieżącym roku odnotowano najniższą zawartości ^{90}Sr – 2,8 mBq $^{-1}$.

6.2.3. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Odry w Głogowie

Rysunek 15 przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach dorzecza Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

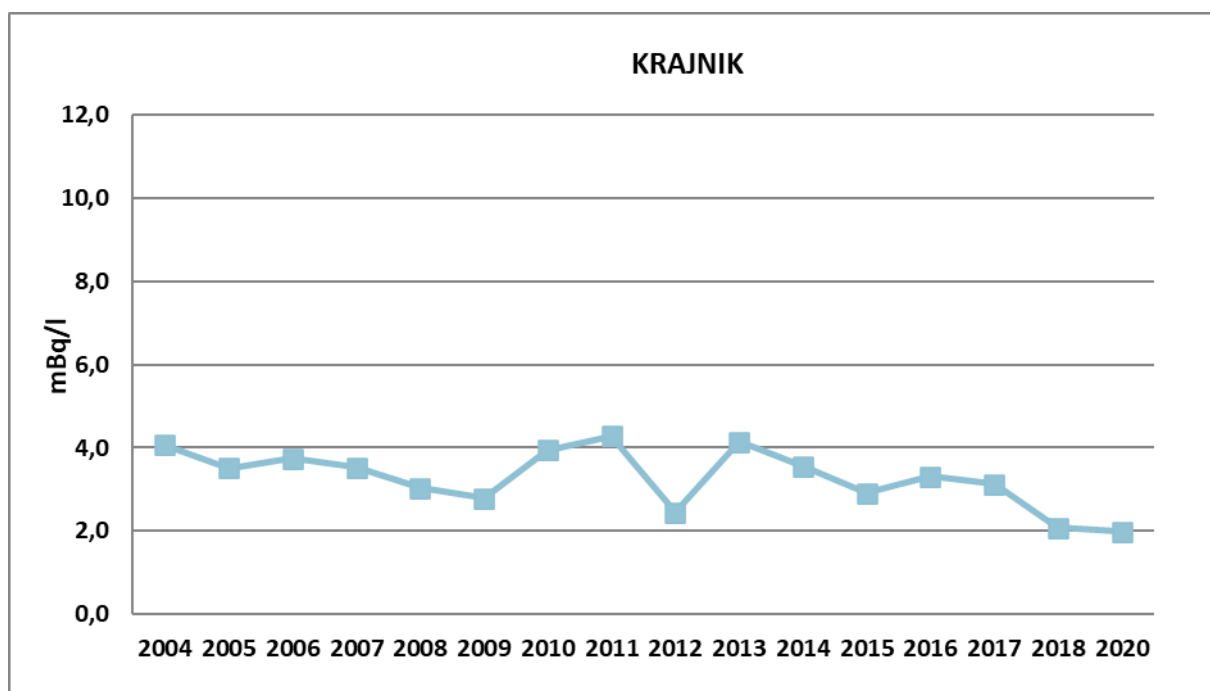


Rys. 15. Zawartość ^{90}Sr w wodach Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020

Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr dla punktu pomiarowego w Głogowie mieści się w dość wąskim zakresie od 2,7 w roku 2010 do 7,1 mBq l^{-1} w 2004 roku. Tą najwyższą wartość, podobnie jak w przypadku ^{137}Cs , odnotowano dla w pierwszego roku obserwacji. W 2020 roku uzyskano jedną z niższych wartości na przestrzeni 16 lat – 2,9 mBq l^{-1} .

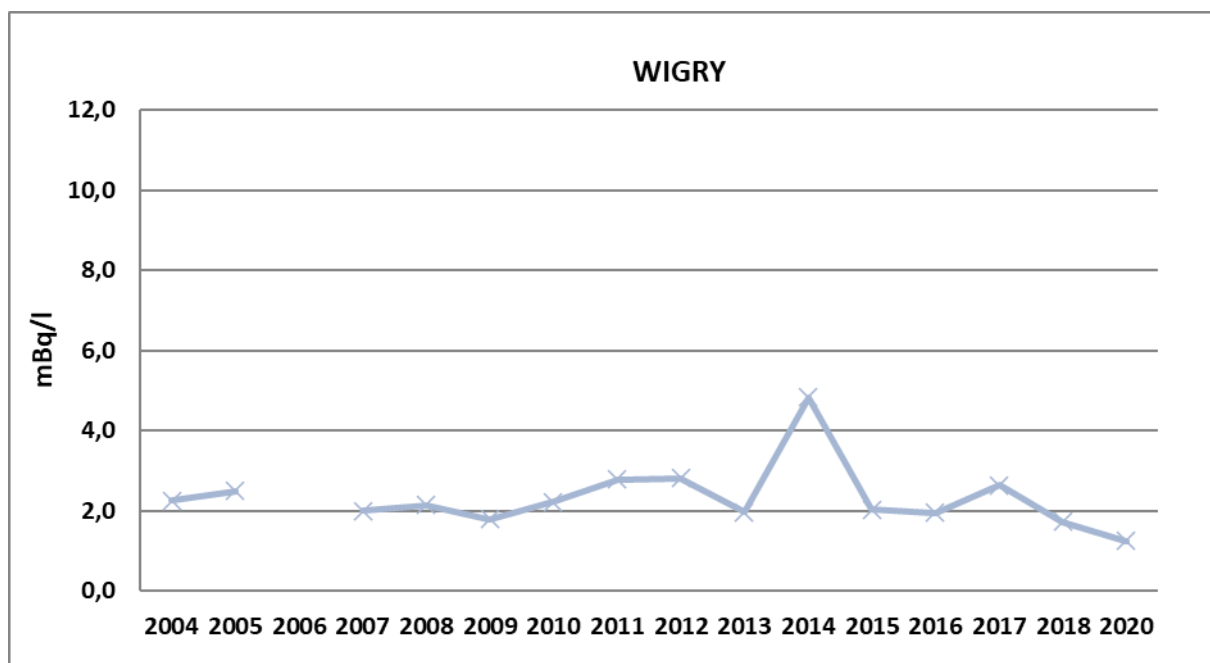
6.2.4. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Odry w Krajniku

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach Odry pobranej w Krajniku w latach 2004-2020 obrazuje Rysunek 16. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. W tym punkcie poboru nie zanotowano znaczących zmian na przestrzeni wszystkich lat pomiarowych, a średnie roczne zawartości ^{90}Sr w wodzie są na bardzo niskim poziomie i mieszczą się w zakresie od 2,0 w roku 2020 do 4,3 mBq l^{-1} w roku 2011.



Rys. 16. Zawartość ^{90}Sr w wodach Odry pobranej w Krajniku w latach 2004-2020

6.2.5. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z jeziora Wigry



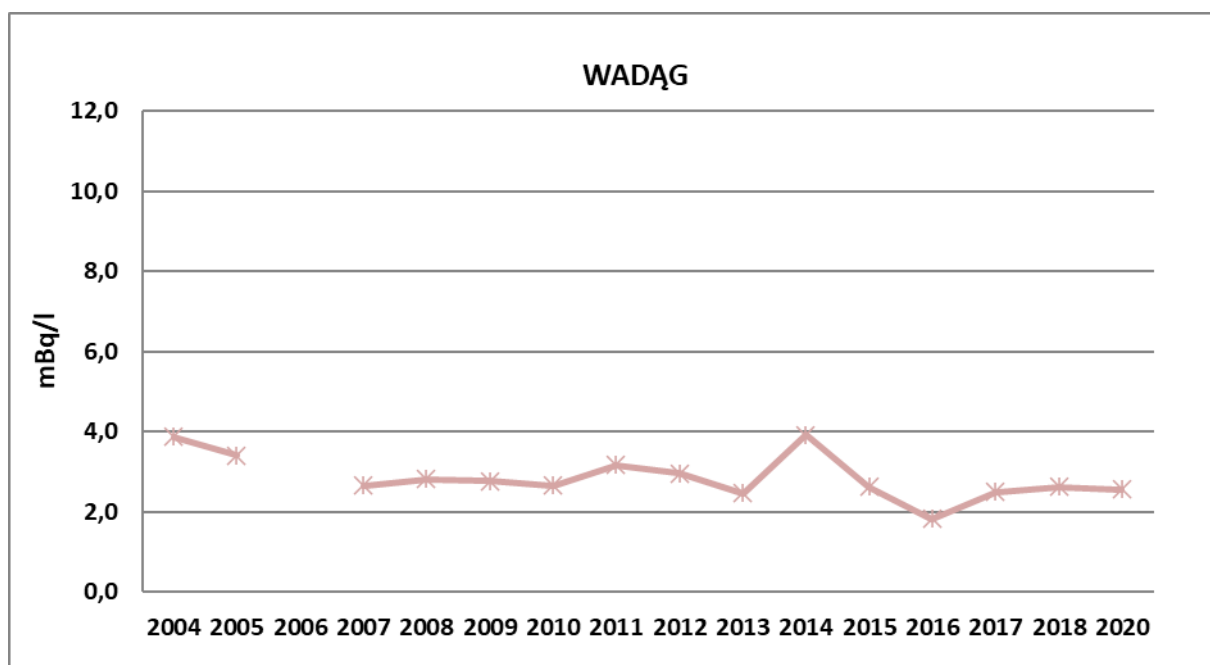
Rys. 17. Zawartość ^{90}Sr w wodach jeziora Wigry w latach 2004-2020

Podobnie jak dla ^{137}Cs średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach jeziora Wigry w latach 2004-2020 było bardzo wyrównane. Nieznaczną rozbieżność stanowi wynik otrzymany w 2014 roku, kiedy wartość stężenia wzrosła dwukrotnie, pozostając jednak na

bardzo niskim poziomie. Trzykrotnie uzyskano wartości mniejsze od 2 mBq l^{-1} , w roku bieżącym wartość średniej rocznej stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr wyniosła $1,2 \text{ mBq l}^{-1}$.

6.2.6. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z jeziora Wadąg

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w badanych wodach pobieranych z jeziora Wadąg były na wyrównanym poziomie i zawierały się w granicach od $1,8 \text{ mBq l}^{-1}$ (2016 rok) do $3,9 \text{ mBq l}^{-1}$ (2004 i 2014 rok). Zmiany zawartości ^{90}Sr w wodach na przestrzeni kilkunastu lat były niewielkie, podobnie jak w przypadku izotopu cezu, przy nieznacznie większej ilości ^{90}Sr w stosunku do ^{137}Cs .

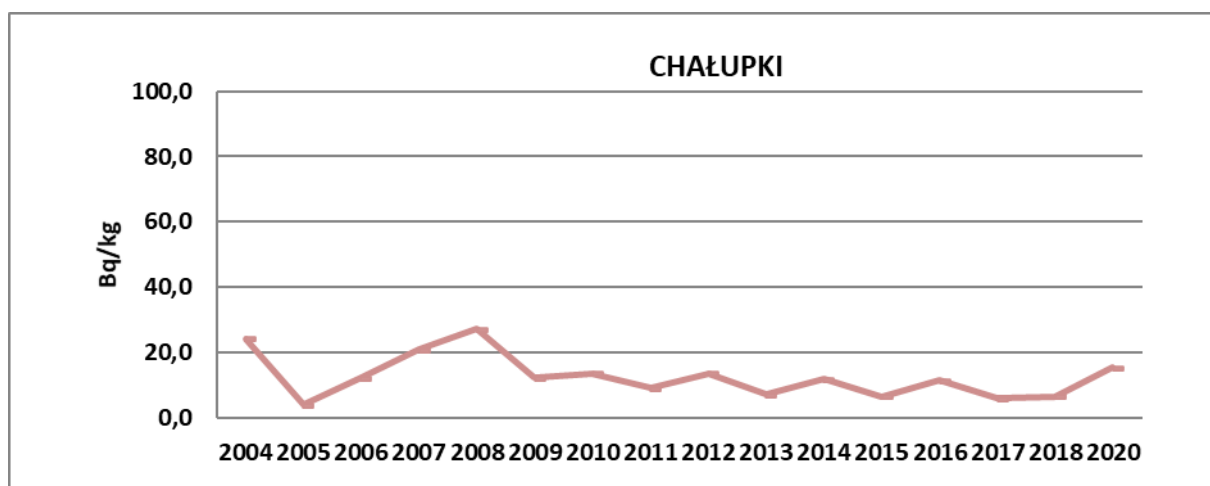


Rys. 18. Zawartość ^{90}Sr w wodach jeziora Wadąg w latach 2004-2020

6.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadach na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych

6.3.1. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Odry w Chałupkach

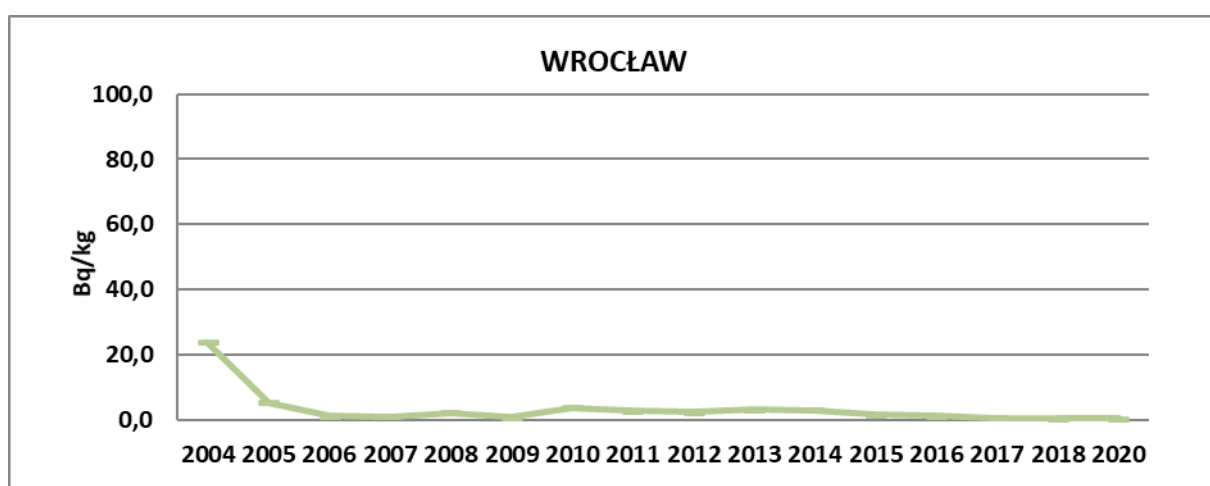
Rysunek 19. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w osadach dorzecza Odry dla punktu pomiarowego w Chałupkach w latach 2004 – 2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.



Rys. 19. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach z Odry pobranych w Chałupkach w latach 2004-2020

W przypadku punktu poboru w Chałupkach występują zmiany zawartości izotopu ¹³⁷Cs w poszczególnych latach obserwacji. Szczególnie jest to widoczne w początkowych sześciu latach obserwacji. Na te fluktuacje mogła mieć wpływ zaobserwowana duża zmienność poziomu wód podczas poboru prób, zarówno pomiędzy poszczególnymi latami, jak nawet pomiędzy poborem wiosennym i jesiennym. Wyższe poziomy wód wiążą się z większym przedostawaniem się różnego rodzaju gleb do rzeki. Mogą się one charakteryzować większą w stosunku do osadu zawartością ¹³⁷Cs. Od 2009 roku obserwujemy mniejsze wahania zawartości izotopu ¹³⁷Cs. Mieszczą się one w granicach od 5,9 Bqkg⁻¹ w roku 2017 do 15,4 Bqkg⁻¹ w roku 2020.

6.3.2. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w osadzie pobranym z Odry we Wrocławiu

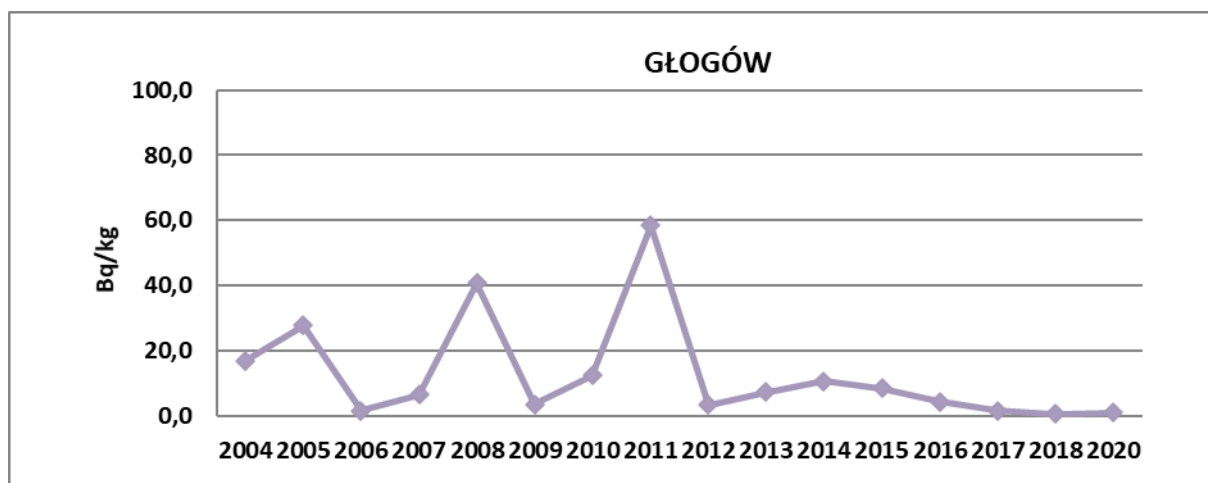


Rys. 20. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach Odry pobranych we Wrocławiu w latach 2004-2020

Zawartość ¹³⁷Cs w osadach Odry pobranych we Wrocławiu w latach 2004-2020 przedstawiona została na Rysunku 20.

W punkcie poboru we Wrocławiu, nieco wyższe wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano w pierwszych latach obserwacji: rok 2004 -23,9 Bqkg^{-1} i w roku 2005 – 5.3 Bqkg^{-1} . W kolejnych latach zawartość ^{137}Cs w osadach była na niskim poziomie i jednocześnie była bardzo stabilna. Minimalną wartość odnotowano w 2018 i 2020 roku - wynosiła ona 0,5 Bqkg^{-1} , zaś maksymalną w roku 2010 – 3,8 Bqkg^{-1} .

6.3.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Odry w Głogowie

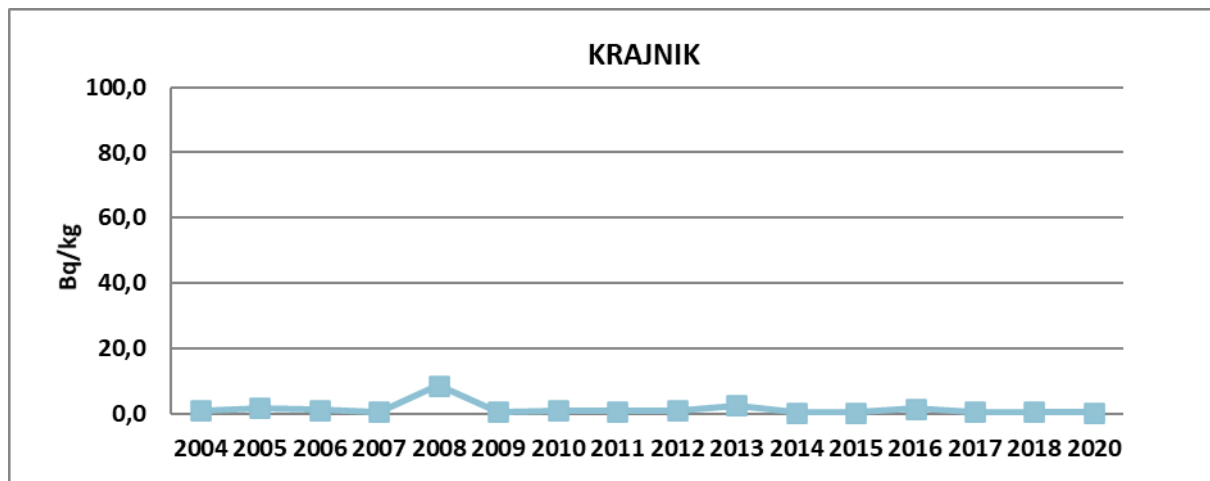


Rys. 21. Zawartość ^{137}Cs w osadach Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020

W osadach pobieranych w Głogowie, w latach 2004 -2011, występują znaczne zmiany zawartości izotopów ^{137}Cs (Rysunek 21). W tym okresie najwyższe wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano w 2011 roku (58,4 Bqkg^{-1}), a najniższe w 2006 roku (1,7 Bqkg^{-1}). Być może, w tym okresie obserwowano większą zmienność warunków atmosferycznych, zarówno pomiędzy poszczególnymi latami, jak nawet pomiędzy poborem wiosennym i jesiennym. Od roku 2012 stężenie promieniotwórcze izotopu ^{137}Cs utrzymuje się na zbliżonym niskim poziomie i mieści się w zakresie od 1,1 Bqkg^{-1} (2020) do 10,7 Bqkg^{-1} (2014).

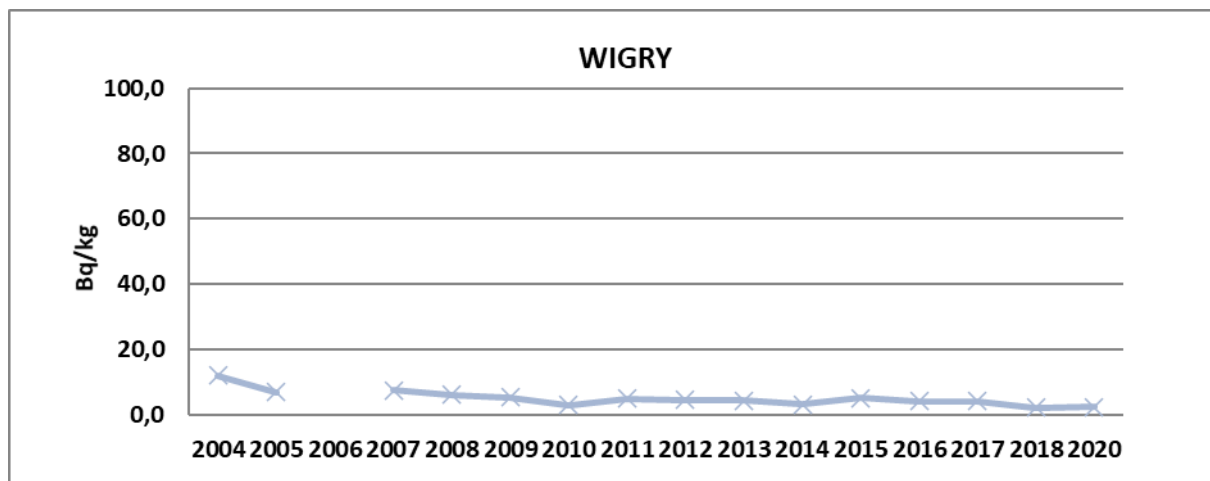
6.3.4. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Odry w Krajniku

Na przestrzeni wszystkich lat badań bardzo wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs w osadach dennych obserwowano w punkcie poboru usytuowanym w Kiezmarku (Rysunek 22.). Zmiany mieszczą się w zakresie 8 Bqkg^{-1} . Prawdopodobnie spowodowane jest to bardziej stabilną sytuacją hydrologiczną niż w przypadku pozostałych punktów poboru.



Rys. 22. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach z Odry pobranej w Krajniku w latach 2004-2020

6.3.5. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w osadzie pobranym z jeziora Wigry



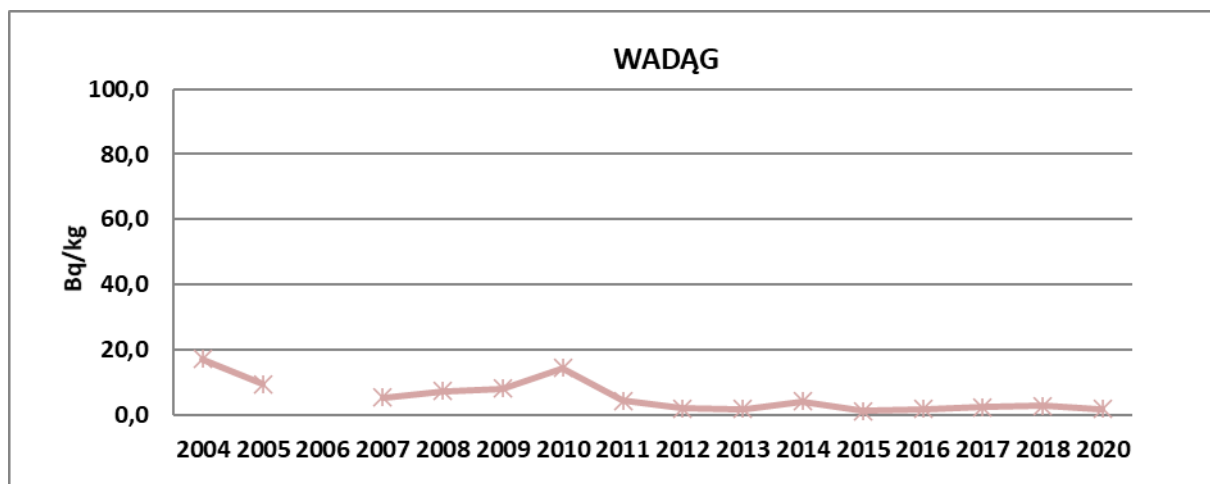
Rys. 23. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach jeziora Wigry pobranych w latach 2004-2020

Na Rysunek 23. pokazano przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ¹³⁷Cs w osadach jeziora Wigry w latach 2004 – 2020. Od początku prowadzenia badań obserwujemy ogólną tendencję spadkową do roku 2010. Od tego czasu widzimy bardzo stabilną sytuację. W tym okresie nieznaczne zmiany stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs mieszczą się w zakresie od 2,2 Bqkg⁻¹ w roku 2018 do 4,9 Bqkg⁻¹ w roku 2011.

6.3.6. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w osadzie pobranym z jeziora Wadąg

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ¹³⁷Cs w osadach pobranych z jeziora Wadąg w latach 2004 – 2020 pokazano na Rysunek 24.

Od początku prowadzenia badań obserwujemy ogólną tendencję spadkową zawartości ^{137}Cs . Wyjątek stanowi podwyższona zawartość ^{137}Cs w roku 2010. W tym roku w naszym kraju miały miejsce liczne powodzie. Mogło wystąpić czasowe naniesieniem w to miejsce osadu, który łatwiej kumulował zanieczyszczenie z wody. Dodatkowo jezioro Wadąg jest jeziorem przepływowym, co również w przypadku obfitych opadów może mieć wpływ na zmiany zawartości badanych izotopów.



Rys. 24. Zawartość ^{137}Cs w osadach jeziora Wadąg pobranych w latach 2004-2020

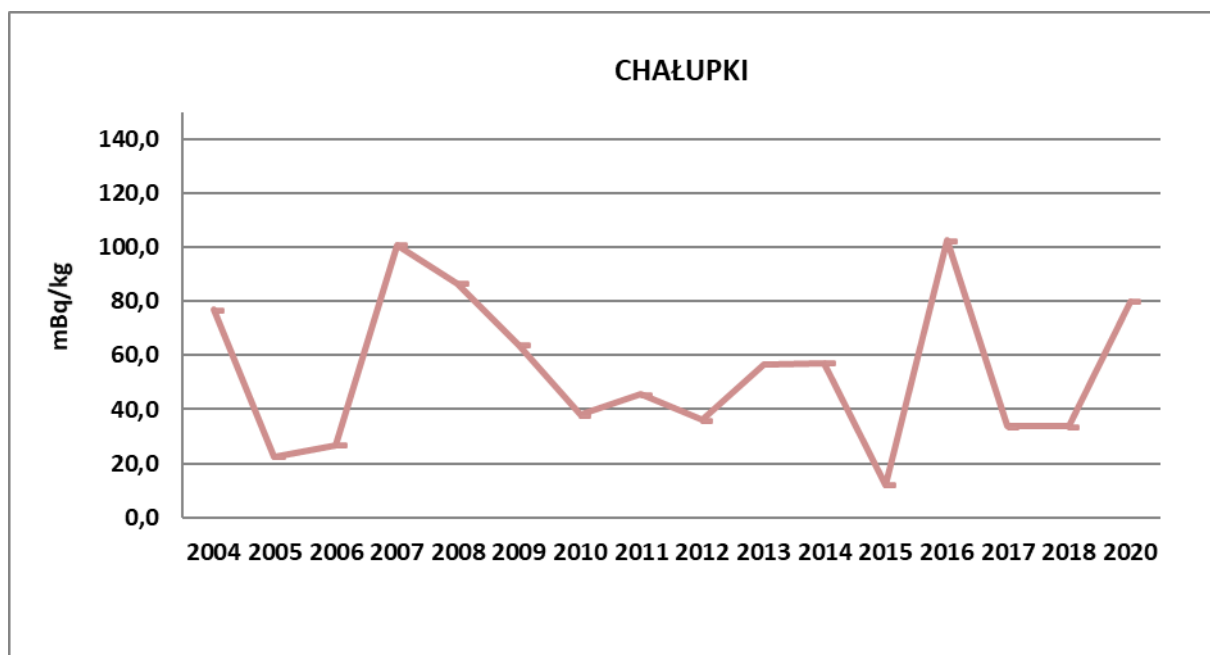
6.4. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych

6.4.1. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Odry w Chałupkach

Rysunek 25. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Odry pobranych Chałupkach w latach 2004-2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

W przypadku punktu poboru w Chałupkach występują znaczne zmiany zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w poszczególnych latach obserwacji. Podobnie, jak w przypadku ^{137}Cs na te fluktuacje może mieć wpływ zaobserwowana dla tych punktów duża zmienność poziomów wód podczas poboru prób, zarówno pomiędzy poszczególnymi latami, jak nawet pomiędzy poborem wiosennym i jesiennym. Wyższe poziomy wód wiążą się z większym przedostawaniem się różnego rodzaju gleb do rzeki. Mogą się one charakteryzować większą zawartością izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w stosunku do osadu. Najwyższą zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$

w osadzie oznaczono roku 2016 i wynosiła ona 102,8 mBq kg⁻¹, najniższą zaś w roku 2015-12,1 mBq kg⁻¹. W bieżącym roku oznaczono izotopy plutonu na poziomie 79,9 mBq kg⁻¹.

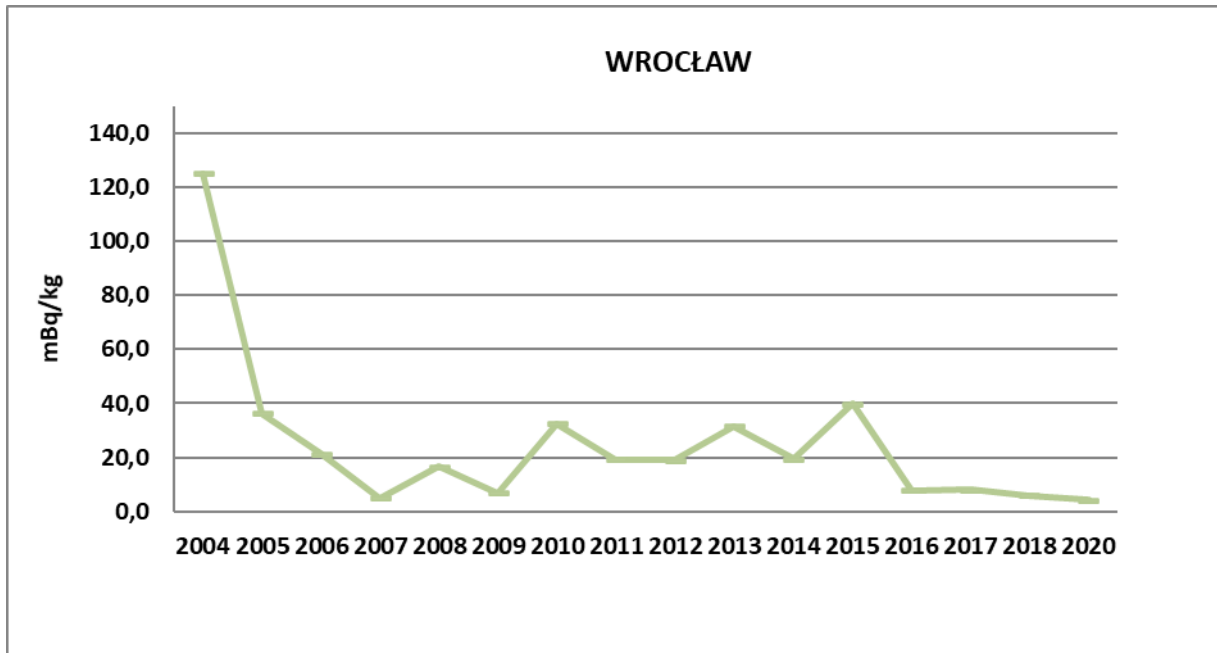


Rys. 25. Zawartość ^{239,240}Pu w osadach z Odry pobranych w Chałupkach w latach 2004-2020

6.4.2. Analiza zawartości ^{239,240}Pu w osadzie pobranym z Odry we Wrocławiu

Rysunek 26. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{239,240}Pu w osadach Odry pobranych we Wrocławiu w latach 2004-2020. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu kilkunastu lat zmiany zawartości ^{239,240}Pu w osadach miały zmienny przebieg, lecz średnie stężenie promieniotwórcze ^{239,240}Pu było na niskim poziomie. Podwyższoną średnią zawartość ^{239,240}Pu odnotowano jedynie w osadzie pobranym w roku 2004, która wynosiła 125,0 mBq kg⁻¹. Poza tym, zakres w jakim obserwowano zmiany to od 4,2 mBq kg⁻¹ w roku 2020 do 39,9 w roku 2015.

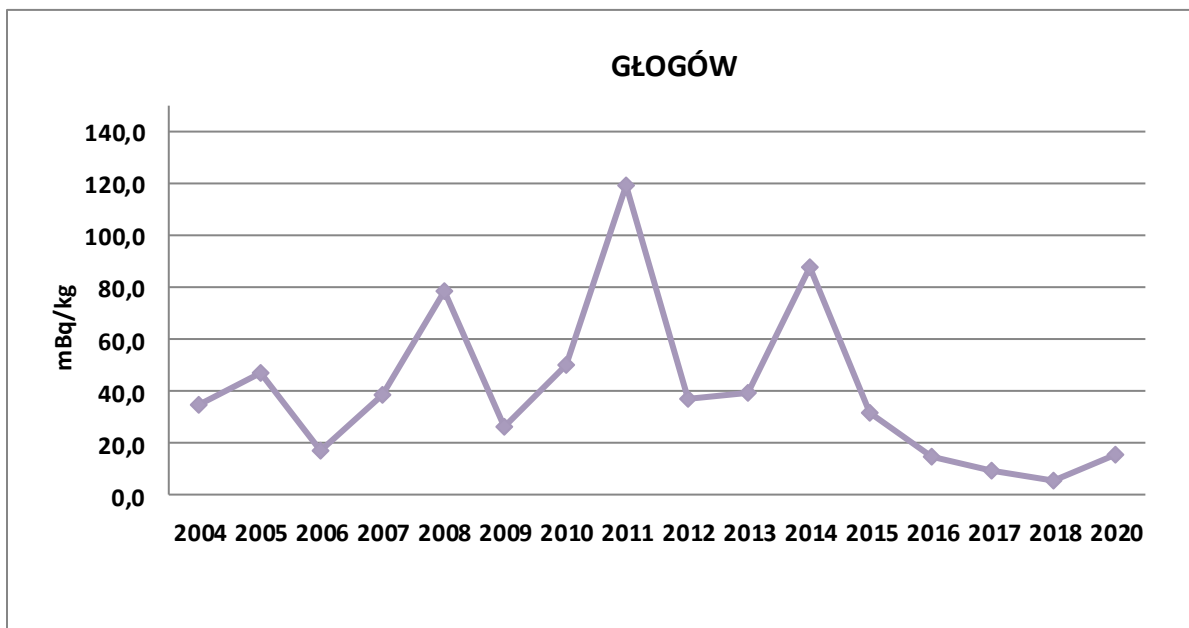


Rys. 26. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Odry pobranych we Wrocławiu w latach 2004-2020

6.4.3. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Odry w Głogowie

Rysunek 27. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020.

W przypadku zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych z Odry pobieranych w Głogowie obserwujemy analogiczną sytuację jak w przypadku zawartości ^{137}Cs .



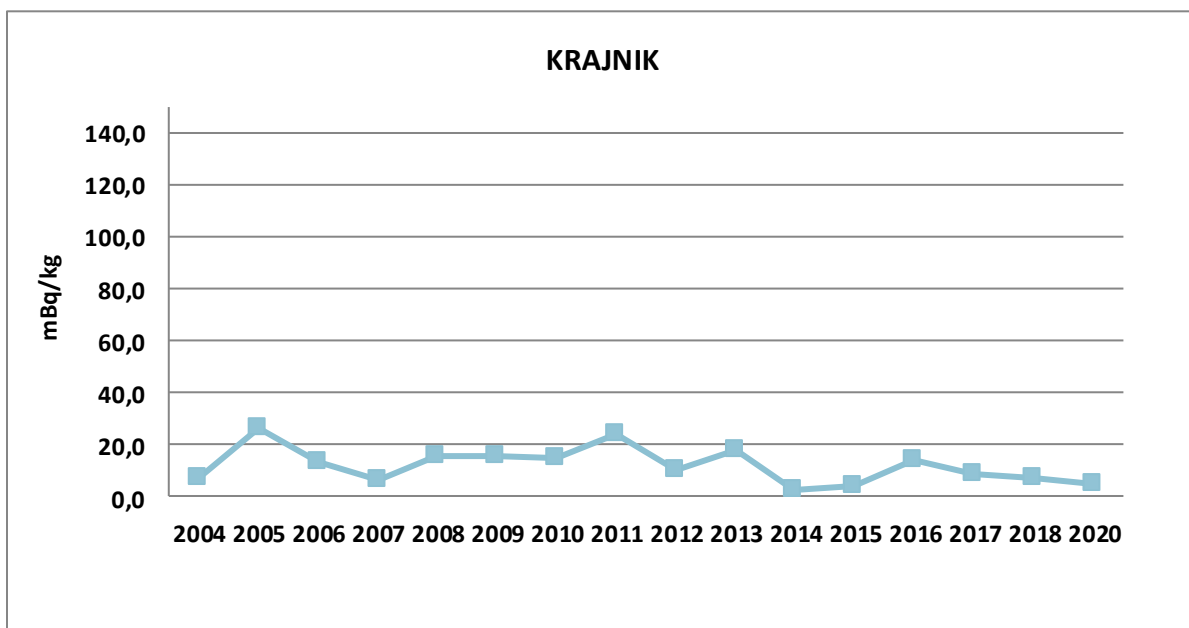
Rys. 27. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Odry pobieranych w Głogowie w lata 2004-2020

Na przestrzeni lat 2004 - 2014 widzimy najbardziej zróżnicowany poziom zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w tym punkcie poboru. Różnice te wahają się od 16,9 mBq kg⁻¹ w roku 2006 do 118,9 mBq kg⁻¹ w roku 2011. Istnieje możliwość, że punkt poboru usytuowany jest w miejscu, w którym występuje zwiększone ryzyko przedostawania się różnego rodzaju gleb do rzeki. Mogą się one charakteryzować większą zawartością izotopu zarówno ^{137}Cs jak i izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w stosunku do osadu. Od roku 2015 obserwujemy bardziej stabilną sytuację. Zmiany w tym okresie mieszczą się w zakresie ok 25 mBq kg⁻¹. W 2020 roku oznaczono izotopy plutonu na poziomie 15,4 mBq kg⁻¹.

6.4.4. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Odry w Krajniku

Rysunek 28. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Odry pobieranych w Krajniku w lata 2004-2020.

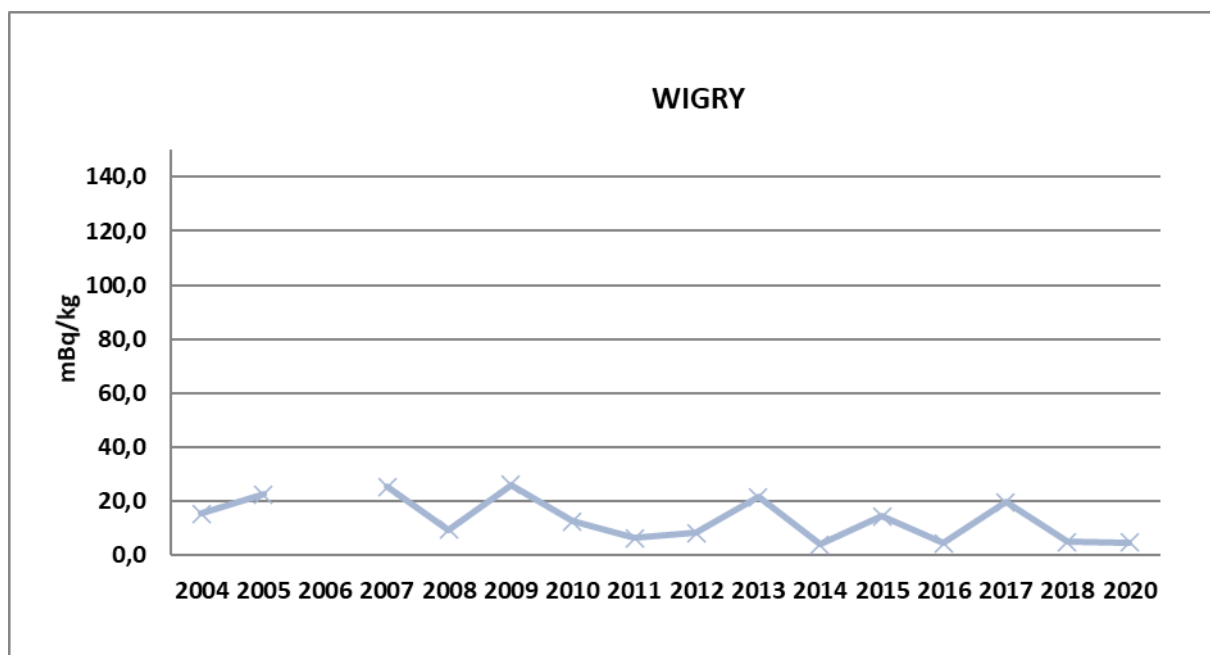
Średni poziom stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach pobieranych w Krajniku w lata 2004-2020 był mniej wyrównany niż dla pozostałych izotopów oznaczanych w tym punkcie. Jednocześnie był bardziej stabilny niż dla innych punktów poboru, co może potwierdzać bardziej stabilną sytuację hydrologiczną.



Rys. 28. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Odry pobranych w Krajniku w latach 2004-2020

Występujące nieznaczne zmiany zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach w poszczególnych latach obserwacji mieszczą się w granicach od 3,0 (rok 2014) do 26,1 mBq kg⁻¹ (rok 2005). Wartość określona w bieżącym roku to 15,4 mBq kg⁻¹.

6.4.5. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z jeziora Wigry



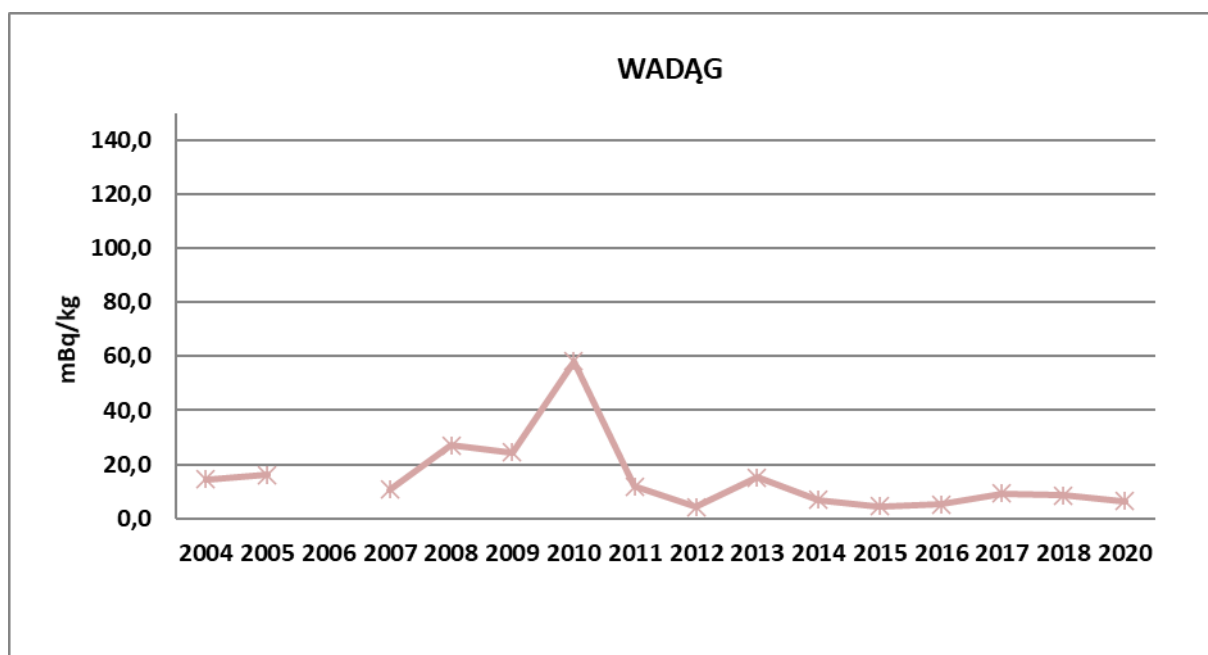
Rys. 29. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Wigry pobranych w latach 2004-2020

Z przedstawionej na Rysunku 29. zależności wynika, że w przeciągu dwunastu lat zmiany zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach jeziora Wigry miały bardziej zmienny przebieg niż w przypadku izotopu cezu. Jednocześnie średnie stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ było na niskim poziomie i w żadnym roku nie przekraczało 30 mBq kg^{-1} . W bieżącym roku uzyskano jedną z najniższych wartości w przeciągu 16 lat badań – $4,8 \text{ mBq kg}^{-1}$.

6.4.6. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z jeziora Wadąg

Z przedstawionej na Rysunku 30 zależności wynika, że w przeciągu dwunastu lat zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach była na niskim poziomie. Podwyższoną zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ odnotowano jedynie w roku 2010. Jest to analogiczna sytuacja jak w przypadku analizowanego w tym osadzie izotopu cezu i może potwierdzać wpływ obfitych deszczy na zmiany zawartości badanych izotopów.

Najbardziej stabilną sytuację obserwujemy na przestrzeni lat 2014 – 2020. W tym okresie zmiany mieszczą się w zakresie zaledwie 4 mBq kg^{-1} .



Rys. 30. Zawartość $^{239, 240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Wadąg pobranych w latach 2004-2020

7. PODSUMOWANIE

Monitoring skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych w 2020 roku obejmował próbki wody i osadów dennych pobrane dwukrotnie (wiosną i jesienią) w 18 punktach, zlokalizowanych w dorzeczu Wisły (7 punktów poboru), w dorzeczu Odry (5 punktów poboru) i w wybranych jeziorach (6 jezior).

Próbki wody z rzek pobierano z głównego nurtu, natomiast wodę z jezior pobierano z pomostów. Objętość próbki wynosiła 20 litrów. Próbki osadów pobierano z trzech miejsc, oddalonych od siebie o ok. 30-50 m i z nich sporządzano próbkę zbiorczą o masie ok. 1 kg.

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach oraz izotopów plutonu w osadach dennych oznaczano metodami radiochemicznymi, natomiast stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych oznaczano metodą spektrometrii gamma.

Porównanie poszczególnych wyników oznaczeń izotopów wiosną i jesienią przysparza trudności, wynikające przede wszystkim z różnych warunków atmosferycznych w jakich dokonywany jest pobór prób. Dlatego ogólną ocenę sytuacji radiologicznej powierzchniowych wód w Polsce przeprowadzono na podstawie średnich stężeń izotopów promieniotwórczych w badanych komponentach środowiska wodnego. W przypadku osadów

dennych różnice te wynikają dodatkowo z różnic w składzie osadów nanoszonych w miejscach poboru próbek (od typowo piaszczystych do ilasto gliniastych), w poszczególnych okresach badań.

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły i Odry wynosiły odpowiednio 3,69 i 4,21 mBq l^{-1} . Niższą wartość oznaczono dla jezior 3,00 mBq l^{-1} . Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior były na zbliżonym poziomie i wynosiły odpowiednio 2,34; 2,52 i 2,76 mBq l^{-1} .

W osadach dennych rzek i jezior obserwuje się duże różnice w stężeniach promieniotwórczych ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$. Największe zróżnicowanie dla wszystkich oznaczanych izotopów obserwowano dla jezior. Najmniejsze różnice w stężeniach zarówno ^{137}Cs jak i $^{239,240}\text{Pu}$ obserwowano w osadach dennych pobranych w dorzeczu Wisły.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych było także zróżnicowane i wynosiło odpowiednio: dla dorzecza Wisły 1,76 Bq kg^{-1} , dla dorzecza Odry 3,59 Bq kg^{-1} i dla jezior 11,47 Bq kg^{-1} .

W przypadku $^{239,240}\text{Pu}$ wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych były bardziej zbliżone dla osadów dorzecza Wisły i Odry, a zdecydowanie wyższe dla jezior i wynosiły odpowiednio: dla dorzecza Wisły – 16,32 mBq kg^{-1} , dla dorzecza Odry – 22,07 mBq kg^{-1} i dla jezior – 112,30 mBq kg^{-1} .

Dla izotopu ^{238}Pu nie przeprowadzono analizy wyników tak jak dla pozostałych pierwiastków, ponieważ od kilku lat w większości przypadków zawartość ^{238}Pu w analizowanych próbkach jest mniejsza od granicy detekcji (1,5 mBq kg^{-1}).

Głównym źródłem izotopów plutonu na terenie Polski był opad promieniotwórczy po próbnym wybuchach jądrowych (maksimum w latach 60-tych), gdzie stosunek izotopu ^{238}Pu do sumy izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ wynosił 0,03-0,05.

Wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórcze wszystkich analizowanych nuklidów jak i oznaczenia uzyskane dla pojedynczych próbek badanej wody i osadów dennych nie odbiegają od wyników uzyskiwanych w poprzednich latach.

8. WNIOSKI

Monitoring skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych pozwala na stwierdzenie, że skażenie wód powierzchniowych takimi nuklidami jak ^{137}Cs i ^{90}Sr jest niewielkie. Podobnie stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych rzek i jezior pozostaje na niskim poziomie.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że nie wystąpiły nowe uwolnienia izotopów promieniotwórczych do środowiska.