



Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

**MONITORING PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO REALIZOWANY W
RAMACH PAŃSTWOWEGO MONITORINGU ŚRODOWISKA W LATACH
2023-2025**

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

ETAP IV

RAPORT

Rok 2024

M. Kardaś, M. Kazimierowicz, M. Dziubałowska, A. Fulara, K. Pachocki,
E. Starościak, K. Wieprzowski, P. Lipiński



NFOŚiGW

Opracowanie wykonano na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska
(umowa nr GIOŚ/ZP/51/2023/DMS/NFOŚ z dnia 03.04.2023 r.) finansowane ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Zastępca Dyrektora
Centralnego Laboratorium
Ochrony Radiologicznej

mgr inż. Paweł Lipiński

CENTRALNE LABORATORIUM
OCHRONY RADIOLOGICZNEJ
ZAKŁAD HIGIENY RADIACYJNEJ
ul. Konwaliowa 7, 03-194 Warszawa
tel. (22) 811-02-51, tel/fax (22) 747-06-12

Kierownik
Zakładu Higieny Radiacyjnej GLOR

dr Małgorzata Kardaś

Marzec 2025

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 , ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ 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 2024 były następujące:

1. Termin wiosenny – od 8 kwietnia do 16 maja;
2. Termin jesienny – od 11 września do 24 października.

1. SŁOWNIK STOSOWANYCH SKRÓTÓW

AMP	fosfomolibdenian amonu
Bq kg ⁻¹	bekerel na kilogram
CLOR	Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
^{137}Cs	izotop cezu 137
CWN	całkowita względna niepewność
°C	stopień Celsjusza
imp/min	impulsy na minutę
keV	kiloelektronowolt
kg	kilogram
m	metr
mBq kg ⁻¹	milibekerel na kilogram
mBq l ⁻¹	milibekerel na litr
min	minuta
ml	mililitr
mm	milimetr
OS	odchylenie standardowe
^{238}Pu	izotop plutonu 238
$^{239,240}\text{Pu}$	suma izotopów plutonu 239, 240
^{242}Pu	izotop plutonu 242
^{90}Sr	izotop strontu 90
T _{1/2}	czas połowicznego zaniku

^{90}Y

izotop itru 90

2. LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH Z PRZEDSTAWIENIEM NA MAPIE.

Usytuowanie miejsc poboru próbek przedstawia Rysunek 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 2024	Data poboru próbek jesień 2024	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Drawsko, Stare Drawsko	<i>zachodnio-pomorskie</i>	09.05	24.10	16°11'51"	53°36'08"
Wadąg, Barczewko	<i>warmińsko-mazurskie</i>	08.04	11.09	20°33'44"	53°51'02"
Partęczyny, Wielkie Partęczyny	<i>kujawsko-pomorskie</i>	09.04	12.09	19°13'02"	53°28'13"
Rogóżno, Rogóżno	<i>lubelskie</i>	06.05	21.10	22°59'25"	51°22'03"
Niesłysz, Niesulice	<i>lubuskie</i>	08.05	23.10	15°24'05"	52°12'41"
Wigry, Stary Folwark	<i>podlaskie</i>	08.04	11.09	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 2024	Data poboru próbek jesień 2024	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Wisła	Kraków Tyniec	06.05	21.10	20°10'48"	50°42'50"
	Annopol	06.05	21.10	21°51'33"	50°53'10"
	Warszawa	16.05	21.10	21°00'59"	52°14'07"
	Płock	09.04	12.09	19°41'52"	52°32'50"
	Kiezmark	09.04	12.09	18°55'51"	54°15'14"
Narew	Pułtusk	08.04	11.09	21°05'08"	52°42'18"
Bug	Wyszaków	08.04	11.09	21°27'22"	52°36'10"
Odra	Chałupki	07.05	22.10	18°19'10"	49°55'22"
	Wrocław	07.05	22.10	16°59'31"	51°08'01"
	Głogów	07.05	22.10	16°04'55"	51°39'11"
	Krajnik	08.05	23.10	14°28'50"	53°11'44"
Warta	Poznań	09.05	24.10	16°55'21"	52°24'30"

3. 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 dennie pobierano używając szufelki, z trzech miejsc oddalonych od siebie o ok. 50 m i sporządzano próbkę zbiorczą o masie około 1 kg. Po przywiezieniu do laboratorium wodę odparowywano z dodatkiem kwasu azotowego; osady dennie 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 fosforomolibdenianu 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 $0,32 \text{ mBq l}^{-1}$. 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 osłonnym o grubości ścianek 10 cm i wyłożonym 2-mm warstwą miedzi. Detektor połączony jest z wielokanałowym analizatorem amplitudy impulsów MULTIPOINT 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 ^{238}Pu i $^{239,240}\text{Pu}$ 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 Multipoint II MCA (Canberra MP2-GE) z oprogramowaniem spektrometrycznym GENIE 2000. Pomiar prowadzono przez 164000 s, a granica detekcji wynosiła $0,2 \text{ mBq/ próbka}$.

4. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs I ^{90}Sr W PRÓBKACH WODY POBRANEJ W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2024 ROKU

4.1. 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 2024 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu. Stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach rzek mieściły się w granicach od 0,65 mBq l⁻¹ w Odrze (Krajnik) do 10,42 mBq l⁻¹ w Wiśle (Warszawa). Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs dla dorzecza Wisły mieścił się w przedziale od 1,51 (Kieźmark) do 5,63 mBq l⁻¹ (Warszawa), a dla dorzecza Odry od 1,31 (Krajnik) do 4,28 mBq l⁻¹ (Chałupki).

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 2024 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	4,21 ± 0,36 ^{a)}	3,25 ± 0,33 ^{a)}	3,73 ± 0,68 ^{b)}
2.	Wisła Annopol	2,24 ± 0,21	1,97 ± 0,22	2,11 ± 0,19
3.	Wisła Warszawa	0,84 ± 0,09	10,42 ± 0,98	5,63 ± 6,77
4.	Wisła Płock	2,32 ± 0,22	3,67 ± 0,31	3,00 ± 0,95
5.	Wisła Kieźmark	2,03 ± 0,18	0,98 ± 0,11	1,51 ± 0,74
6.	Narew Pułtusk	2,28 ± 0,19	1,79 ± 0,17	2,04 ± 0,35
7.	Bug Wyszków	1,23 ± 0,12	2,05 ± 0,19	1,64 ± 0,58
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	2,98 ± 0,23	5,57 ± 0,54	4,28 ± 1,83
9.	Odra Wrocław	3,41 ± 0,26	2,88 ± 0,34	3,15 ± 0,37
10.	Odra Głogów	2,85 ± 0,26	2,17 ± 0,27	2,51 ± 0,48
11.	Odra Krajnik	1,97 ± 0,17	0,65 ± 0,09	1,31 ± 0,93
12.	Warta Poznań	1,91 ± 0,17	1,55 ± 0,16	1,73 ± 0,25

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

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

4.2. 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 2024 roku.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych rzek mieściło się w zakresie się od 2,82 mBq l^{-1} w wodzie z Bugu (Wyszków) do 5,03 mBq l^{-1} w wodzie pobranej z Wisły w Warszawie.

Tabela 4. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2024r.

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	$3,46 \pm 0,45^a)$	$4,08 \pm 0,49^a)$	$3,77 \pm 0,44^b)$
2.	Wisła Annopol	$2,58 \pm 0,31$	$4,45 \pm 0,54$	$3,52 \pm 1,32$
3.	Wisła Warszawa	$3,82 \pm 0,48$	$6,24 \pm 0,72$	$5,03 \pm 1,71$
4.	Wisła Płock	$3,50 \pm 0,39$	$2,96 \pm 0,35$	$3,23 \pm 0,38$
5.	Wisła Kieźmark	$4,13 \pm 0,57$	$2,75 \pm 0,40$	$3,44 \pm 0,98$
6.	Narew Pułtusk	$4,18 \pm 0,57$	$2,39 \pm 0,34$	$3,29 \pm 1,27$
7.	Bug Wyszków	$3,17 \pm 0,40$	$2,46 \pm 0,28$	$2,82 \pm 0,50$
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	$2,50 \pm 0,31$	$4,40 \pm 0,49$	$3,45 \pm 1,34$
9.	Odra Wrocław	$2,78 \pm 0,33$	$3,85 \pm 0,38$	$3,32 \pm 0,76$
10.	Odra Głogów	$3,45 \pm 0,37$	$4,02 \pm 0,45$	$3,74 \pm 0,40$
11.	Odra Krajnik	$3,24 \pm 0,44$	$5,11 \pm 0,69$	$4,18 \pm 1,32$
12.	Warta Poznań	$3,41 \pm 0,35$	$4,17 \pm 0,49$	$3,79 \pm 0,54$

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

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr były bardzo wyrównane dla dorzecza Odry i mieściły się w zakresie od 3,32 do 4,18 mBq l^{-1} . Dla dorzecza Wisły były bardziej zróżnicowane od 2,82 do 5,03 mBq l^{-1} .

Najwyższą wartość stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej jesienią z Wisły w Warszawie – $6,24 \text{ mBq l}^{-1}$, najniższą w próbce wody pobranej wiosną z Narwi w Pułtusku – $2,39 \text{ mBq l}^{-1}$.

4.3. Ocena zawartości ^{137}Cs w wodach badanych jezior

Tabela 5. przedstawia stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w próbkach wody z poszczególnych miejsc poboru próbek w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym 2024 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu. Stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs oznaczone w wodach jezior mieściły się w granicach od $0,45 \text{ mBq l}^{-1}$ wiosną w jeziorze Wadąg do $5,23 \text{ mBq l}^{-1}$ w jeziorze Rogóno również wiosną. Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs wynosił od $0,94 \text{ mBq l}^{-1}$ w jeziorze Wadąg do $4,19 \text{ mBq l}^{-1}$ w jeziorze Rogóno. W tym roku najwyższą średnią wartość stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs odnotowywano w próbkach wody z jeziora Rogóno. Nie odbiega jednak znacząco od pozostałych średnich wartości stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs oznaczonego w pozostałych jeziorach.

Tabela 5. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2024 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	$0,99 \pm 0,11^{\text{a)}}$	$1,64 \pm 0,32^{\text{a)}}$	$1,32 \pm 0,46^{\text{b)}}$
2	Wadąg Barczewko	$0,45 \pm 0,05$	$1,42 \pm 0,13$	$0,94 \pm 0,69$
3	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$1,33 \pm 0,14$	$0,80 \pm 0,16$	$1,07 \pm 0,37$
4	Drawsko Stare Drawsko	$1,66 \pm 0,15$	$1,75 \pm 0,17$	$1,71 \pm 0,06$
5	Niesłysz Niesulice	$2,48 \pm 0,20$	$0,82 \pm 0,11$	$1,65 \pm 1,17$
6	Rogóno Rogóno	$5,23 \pm 0,41$	$3,15 \pm 0,32$	$4,19 \pm 1,47$

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

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

4.4. 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 2024 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	$2,75 \pm 0,29^{\text{a)}}$	$2,44 \pm 0,30^{\text{a)}}$	$2,60 \pm 0,22^{\text{b)}}$
2	Wadąg Barczewko	$3,36 \pm 0,37$	$2,54 \pm 0,27$	$2,95 \pm 0,58$
3	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$2,62 \pm 0,31$	$2,77 \pm 0,30$	$2,70 \pm 0,11$
4	Drawsko Stare Drawsko	$3,27 \pm 0,34$	$6,98 \pm 0,80$	$5,13 \pm 2,69$
5	Niesłysz Niesulice	$1,52 \pm 0,23$	$3,33 \pm 0,32$	$2,43 \pm 1,28$
6	Rogóźno Rogóźno	$7,52 \pm 0,91$	$6,83 \pm 0,61$	$7,18 \pm 0,46$

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

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

Stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach z poszczególnych miejsc poboru w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym 2024 roku oraz jego roczne stężenie promieniotwórcze przedstawia Tabela 6.

Najniższą wartość stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej wiosną z jeziora Niesłysz – $1,52 \text{ mBq l}^{-1}$. Najwyższą w wiosennej próbce wody z jeziora Rogóźno – $7,52 \text{ mBq l}^{-1}$. Podobnie jak w latach ubiegłych najwyższe wartości stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr notuje się w próbkach wody z jeziora Rogóźno. Ponadto w roku 2024 oznaczono wyższą wartość stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr w próbce pobranej jesienią z jeziora Drawsko ($6,98 \text{ mBq l}^{-1}$)

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych jezior wahało się od $2,43 \text{ mBq l}^{-1}$ w wodzie z jeziora Niesłysz do $7,18 \text{ mBq l}^{-1}$ w wodzie pobranej z jeziora Rogóźno.

4.5. 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: 2,81; 2,59; 1,81 mBq l^{-1} .

Największe różnice w stężeniach promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano dla wód dorzecza Wisły (0,84–10,42 mBq l^{-1}), najmniejsze dla wód jeziornych (0,45–5,23 mBq l^{-1}).

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs oznaczono w wodach jeziornych w okresie jesiennym i wynosiło ono 1,60 mBq l^{-1} , najwyższe także jesienią w wodach dorzecza Wisły – 3,45 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 2024 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)}	$2,16 \pm 1,07^{\text{b)}}$	$3,45 \pm 3,21^{\text{b)}}$	$2,81 \pm 2,39^{\text{b)}}$ (14)	0,84 – 10,42
Dorzecze Odry (5)	$2,62 \pm 0,66$	$2,56 \pm 1,87$	$2,59 \pm 1,32$ (10)	0,65 – 5,57
Jeziora (6)	$2,02 \pm 1,71$	$1,60 \pm 0,86$	$1,81 \pm 1,31$ (12)	0,45 – 5,23
Średnia ogólna (18)	$2,25 \pm 1,20$	$2,59 \pm 2,31$	$2,42 \pm 1,82$ (36)	0,45 – 10,42

^{a)} Liczba próbek wody

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

4.6. 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 2024 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)}	$3,55 \pm 0,56^{\text{b)}}$	$3,62 \pm 1,40^{\text{b)}}$	$3,58 \pm 1,03^{\text{b)}}$ (14)	2,39 – 6,24
Dorzecze Odry (5)	$3,08 \pm 0,42$	$4,31 \pm 0,49$	$3,69 \pm 0,78$ (10)	2,50 – 5,11
Jeziora (6)	$3,51 \pm 2,07$	$4,15 \pm 2,17$	$3,83 \pm 2,05$ (12)	1,52 – 7,52
Średnia ogólna (18)	$3,40 \pm 1,21$	$3,99 \pm 1,49$	$3,70 \pm 1,37$ (36)	1,52 – 7,52

^{a)} Liczba próbek wody

^{b)} Wartość średnia $\pm$ OS

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w dorzeczu Wisły, Odry oraz wodach jezior było na zbliżonym poziomie i wynosiło odpowiednio $3,58 \text{ mBq l}^{-1}$; $3,69 \text{ mBq l}^{-1}$ i $3,83 \text{ mBq l}^{-1}$

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr oznaczono w wodach dorzecza Odry w okresie wiosennym i wynosiło ono $3,08 \text{ mBq l}^{-1}$, najwyższe jesienią także w wodach dorzecza Odry – $4,31 \text{ mBq l}^{-1}$.

Najmniejsze różnice w stężeniach ^{90}Sr (zakres $2,50 - 5,11 \text{ mBq l}^{-1}$) odnotowano dla wód dorzecza Odry, największe dla wód jeziornych (zakres $1,52 - 7,52 \text{ mBq l}^{-1}$).

4.7. Analiza zależności pomiędzy zawartościami ^{137}Cs i ^{90}Sr w próbkach badanych w 2024 roku

Tabela 9. przedstawia średnie roczne wartości oraz stosunki stężenia ^{90}Sr do ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły, dorzecza Odry i jezior w 2024 roku.

Stosunek średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr do ^{137}Cs zarówno dla dorzecza Wisły jak i dorzecza Odry przekracza wartość 1. Natomiast dla wód jeziornych wynosi 2.12.

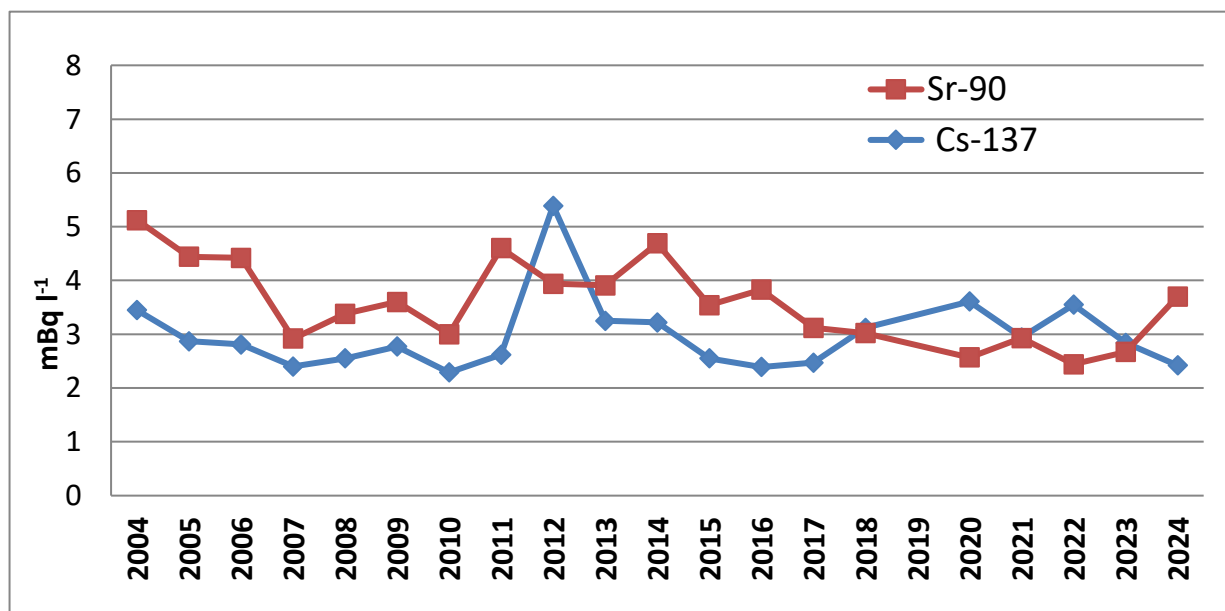
Tabela 9. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior oraz stosunek średnich rocznych stężeń w 2024 r.

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)}	$2,81 \pm 2,39^{\text{b)}}(14)$	$3,58 \pm 1,03^{\text{b)}}(14)$	1,27
Dorzecze Odry (5)	$2,59 \pm 1,32(10)$	$3,69 \pm 0,78(10)$	1,42
Jeziora (6)	$1,81 \pm 1,31(12)$	$3,83 \pm 2,05(12)$	2,12
Średnia ogólna (18)	$2,42 \pm 1,82(36)$	$3,70 \pm 1,37(36)$	1,53

^{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 – 2024. 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 do roku 2017. W tym okresie wyjątkiem był rok 2012. Od roku 2018 stężenie ^{137}Cs w badanych wodach jest nieznacznie wyższe od stężenia ^{90}Sr . 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 stanach wód. Od 2014 roku obserwujemy tendencję spadkową zawartości ^{90}Sr w badanych wodach. W bieżącym roku odnotowaliśmy nieznaczny wzrost stężenia tego izotopu. Natomiast stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs utrzymuje się na podobnym poziomie biorąc pod uwagę błąd oznaczenia wynoszący ok. 15%. Szczególnie jest to widoczne dla próbek pobieranych w ostatnich kilku latach.



Rys. 2. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach rzek i jezior w Polsce w latach 2004 – 2024

5. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs , ^{238}Pu I $^{239,240}\text{Pu}$ W ODSADACH DENNYCH POBRANYCH W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2024 ROKU

5.1. 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 2024 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 Tyniec	$2,25 \pm 0,17^{\text{a}}$	$6,67 \pm 0,43^{\text{a}}$	$4,46 \pm 3,13^{\text{b}}$
2.	Wisła Annopol	$0,13 \pm 0,03$	$8,47 \pm 0,53$	$4,30 \pm 5,90$
3.	Wisła Warszawa	$0,81 \pm 0,12$	$1,12 \pm 0,07$	$0,97 \pm 0,22$
4.	Wisła Płock	$< 0,2$	$< 0,2$	-
5.	Wisła Kieźmark	$1,36 \pm 0,19$	$1,58 \pm 0,18$	$1,47 \pm 0,16$
6.	Narew Pułtusk	$6,39 \pm 0,45$	$1,96 \pm 0,15$	$4,18 \pm 3,13$
7.	Bug Wyszków	$5,03 \pm 0,38$	$0,28 \pm 0,05$	$2,66 \pm 3,36$
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	$10,59 \pm 0,67$	$9,88 \pm 0,63$	$10,24 \pm 0,50$
9.	Odra Wrocław	$0,22 \pm 0,06$	$0,39 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,12$
10.	Odra Głogów	$13,50 \pm 0,40$	$0,38 \pm 0,05$	$6,94 \pm 9,28$
11.	Odra Krajnik	$0,77 \pm 0,16$	$0,56 \pm 0,09$	$0,67 \pm 0,15$
12.	Warta Poznań	$0,50 \pm 0,09$	$0,44 \pm 0,05$	$0,47 \pm 0,04$

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

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

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

Po raz pierwszy nie oznaczono stężenia promieniotwórczego w osadzie pobranym w Płocku zarówno wiosną jak i jesienią.

Najniższe stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs było oznaczone wiosną w osadzie pobranym z Wisły w Annopolu i wynosiło $0,13 \text{ Bq kg}^{-1}$. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze tego izotopu zawierały się w granicach od $0,31 \text{ Bq kg}^{-1}$ do $10,24 \text{ Bq kg}^{-1}$ i odnosiły się odpowiednio do osadów pobranych na Odrze we Wrocławiu i na Odrze w Chałupkach.

Najwyższe stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs było oznaczone wiosną w osadzie pobranym z Odry w Głogowie ($13,50 \text{ Bq kg}^{-1}$). Pomimo, że jest wielokrotnie wyższe od najniższych wartości przedstawionych w tabeli pozostaje jednak na niskim poziomie i nie odbiega 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).

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

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

Najniższe stężenia promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ były oznaczone jesienią w osadzie pobranym z Warty w Poznaniu ($1,54 \text{ mBq kg}^{-1}$). Najwyższe w osadzie z Odry pobranym wiosną w Chałupkach ($73,12 \text{ mBq kg}^{-1}$). Wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych zawierają się w granicach od $3,70 \text{ mBq kg}^{-1}$ w osadzie z Wisły (Płock) do $64,60 \text{ mBq kg}^{-1}$ w osadzie z Odry (Chałupki).

Stężenie promieniotwórcze ^{238}Pu w osadach dennych (podobnie jak w roku ubiegłym) było w większości przypadków mniejsze od granicy detekcji ($1,5 \text{ mBq kg}^{-1}$). W przypadku dorzeczy Wisły i Odry ^{238}Pu został oznaczony w 7 próbkach osadów pobranych wiosną i 2 próbkach pobranych jesienią spośród 24 pobranych próbek osadów.

Tabela 11. Stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ i ^{238}Pu w osadach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie $^{239,240}\text{Pu}$ w 2024 r.

Lp.	Miejsce poboru próbki	$^{239,240}\text{Pu}$ wiosna mBq kg^{-1}	^{238}Pu wiosna mBq kg^{-1}	$^{239,240}\text{Pu}$ jesień mBq kg^{-1}	^{238}Pu jesień mBq kg^{-1}	$^{239,240}\text{Pu}$ średnia roczna mBq kg^{-1}
DORZECZE WISŁY						
1.	Wisła Kraków	$25,43 \pm 4,50^{\text{a}}$	$2,45 \pm 1,56$	$27,32 \pm 2,59^{\text{a}}$	$5,69 \pm 1,19$	$26,38 \pm 1,34^{\text{b}}$
2.	Wisła Annopol	$8,88 \pm 1,43$	$< 1,5$	$63,00 \pm 3,90$	$< 1,5$	$35,94 \pm 38,27$
3.	Wisła Warszaw	$7,48 \pm 0,60$	$< 1,5$	$9,94 \pm 1,96$	$< 1,5$	$8,71 \pm 1,74$
4.	Wisła Płock	$2,78 \pm 0,64$	$1,97 \pm 0,88$	$4,62 \pm 1,36$	$< 1,5$	$3,70 \pm 1,30$
5.	Wisła Kieźmark	$10,22 \pm 2,01$	$6,34 \pm 1,58$	$11,36 \pm 2,02$	$< 1,5$	$10,79 \pm 0,81$
6.	Narew Pułtusk	$24,28 \pm 3,60$	$5,14 \pm 1,70$	$4,77 \pm 1,35$	$< 1,5$	$14,53 \pm 13,80$
7.	Bug Wyszaków	$52,91 \pm 4,76$	$2,11 \pm 1,01$	$3,06 \pm 1,03$	$< 1,5$	$27,99 \pm 35,25$
DORZECZE ODRY						
8.	Odra Chałupki	$73,12 \pm 6,06$	$2,40 \pm 1,15$	$56,08 \pm 4,05$	$< 1,5$	$64,60 \pm 12,05$
9.	Odra Wrocław	$3,08 \pm 1,46$	$< 1,5$	$7,60 \pm 1,74$	$< 1,5$	$5,34 \pm 3,20$
10.	Odra Głogów	$60,21 \pm 3,87$	$< 1,5$	$3,32 \pm 1,23$	$< 1,5$	$31,77 \pm 40,23$
11.	Odra Krajnik	$11,57 \pm 2,54$	$< 1,5$	$6,61 \pm 1,76$	$2,22 \pm 1,06$	$9,09 \pm 3,51$
12.	Warta Poznań	$11,47 \pm 2,58$	$1,76 \pm 1,12$	$1,54 \pm 0,94$	$< 1,5$	$6,51 \pm 7,02$

^{a)}Wartość $\pm$ CWN przy poziomie ufności 68%.

^{b)}Wartość średnia $\pm$ OS

5.3. Ocena zawartości ^{137}Cs w osadach dennych badanych jezior

Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs 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 $0,56 \text{ Bq kg}^{-1}$ w osadzie pobranym jesienią z jeziora Wigry do $113,36 \text{ Bq kg}^{-1}$ w osadzie pobranym również jesienią z jeziora Rogóźno. Najniższe średnie roczne stężenie ^{137}Cs ($1,36 \text{ Bq kg}^{-1}$) było oznaczone w osadach z jeziora Wielkie Partęczyny, a najwyższe ($102,98 \text{ Bq kg}^{-1}$) w osadach z jeziora

Rogóźno. Z wieloletnich obserwacji wynika, że dla jeziora Rogóźno charakterystyczne są większe wartości stężenia promieniotwórczego ^{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 ten typ jezior często charakteryzuje 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 2024r.

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	$6,18 \pm 0,45^{\text{a}}$	$0,56 \pm 0,05^{\text{a}}$	$3,37 \pm 3,97^{\text{b}}$
2.	Wadąg Barczewko	$1,82 \pm 0,14$	$1,55 \pm 0,11$	$1,69 \pm 0,19$
3.	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$0,89 \pm 0,10$	$1,83 \pm 0,13$	$1,36 \pm 0,66$
4.	Drawsko Stare Drawsko	$1,84 \pm 0,18$	$1,45 \pm 0,12$	$1,65 \pm 0,28$
5.	Niesłysz Niesulice	$5,52 \pm 0,40$	$4,62 \pm 0,33$	$5,07 \pm 0,64$
6.	Rogóźno Rogóźno	$92,60 \pm 1,90$	$113,36 \pm 3,73$	$102,98 \pm 14,68$

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

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

5.4. 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 $^{239,240}\text{Pu}$ ($0,54 \text{ mBq kg}^{-1}$) było oznaczone jesienią w osadzie pobranym z jeziora Wigry, a największe $779,92 \text{ mBq kg}^{-1}$ w osadzie wiosennym z jeziora Rogóźno.

Średnie roczne stężenie izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych zawiera się w granicach od $2,45 \text{ mBq kg}^{-1}$ w jeziorze Wielkie Partęczyny do $630,51 \text{ mBq kg}^{-1}$ w jeziorze Rogóźno.

Tabela 13. Stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2024 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	$10,52 \pm 2,55^{\text{b)}}$	$0,54 \pm 0,53^{\text{b)}}$	$5,53 \pm 7,06^{\text{b)}}$
2.	Wadąg Barczewko	$6,91 \pm 1,63$	$6,14 \pm 1,05$	$6,53 \pm 0,54$
3.	Wielkie Parteczyny Parteczyny	$1,35 \pm 0,87$	$3,54 \pm 1,09$	$2,45 \pm 1,55$
4.	Drawsko Stare Drawsko	$4,69 \pm 1,92$	$3,15 \pm 1,09$	$3,92 \pm 1,09$
5.	Niesłysz Niesulice	$6,83 \pm 1,61$	$1,62 \pm 0,99$	$4,23 \pm 3,69$
6.	Rogóźno Rogóźno	$779,92 \pm 24,30$	$481,09 \pm 19,66$	$630,51 \pm 211,30$

^{a)}Wartość $\pm$ CWN przy poziomie ufności 68% ^{b)}Wartość średnia $\pm$ OS

Stężenie ^{238}Pu w osadach dennych było oznaczone w 2 spośród 12 próbek, a oba osady były pobrane z jeziora Rogóźno: wiosną ($30,91 \pm 3,37 \text{ mBq kg}^{-1}$) oraz jesienią ($8,54 \pm 2,20 \text{ mBq kg}^{-1}$).

5.5. 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 było zróżnicowane i wynosiło odpowiednio 2,59; 3,72 i 19,35 Bq kg^{-1} . Największe różnice w stężeniach ^{137}Cs obserwowano dla osadów jeziornych od 0,56 do 113,36 Bq kg^{-1} .

Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w 2024 roku było najniższe wiosną w dorzeczu Wisły i wynosiło 2,30 Bq kg^{-1} , Najwyższą wartość oznaczono jesienią w jeziorach – 20,56 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 2024 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)}	$2,30 \pm 2,49$	$2,88 \pm 3,31$	$2,59 \pm 2,83(14)$	0,13–8,47
Dorzecze Odry (5)	$5,12 \pm 6,41$	$2,33 \pm 4,22$	$3,72 \pm 4,96 (10)$	0,22–13,50
Jeziora (6)	$18,14 \pm 36,54$	$20,56 \pm 45,48$	$19,35 \pm 39,35 (12)$	0,56–113,36
Średnia ogólna (18)	$8,36 \pm 21,37$	$8,62 \pm 26,31$	$8,49 \pm 23,73(36)$	0,13–113,36

^{a)} Liczba próbek osadów dennych^{b)} Wartość średnia $\pm$ OS

5.6. 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 2024 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)}	$18,85 \pm 17,29^{\text{b)}}$	$17,72 \pm 21,59$	$18,29 \pm 18,80 (14)$	2,78–63,00
Dorzecze Odry (5)	$31,89 \pm 32,26$	$15,03 \pm 23,08$	$23,46 \pm 27,89 (10)$	1,54–73,12
Jeziora (6)	$135,04 \pm 315,94$	$82,68 \pm 195,19$	$108,86 \pm 251,87(12)$	0,54–779,92
Średnia ogólna (18)	$61,20 \pm 180,62$	$38,63 \pm 111,91$	$49,92 \pm 145,79 (36)$	0,54–779,92

^{a)} Liczba próbek osadów dennych^{b)} Średnia $\pm$ 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 $18,29 \text{ mBq kg}^{-1}$, $23,46 \text{ mBq kg}^{-1}$ i $108,86 \text{ mBq kg}^{-1}$. Największe różnice

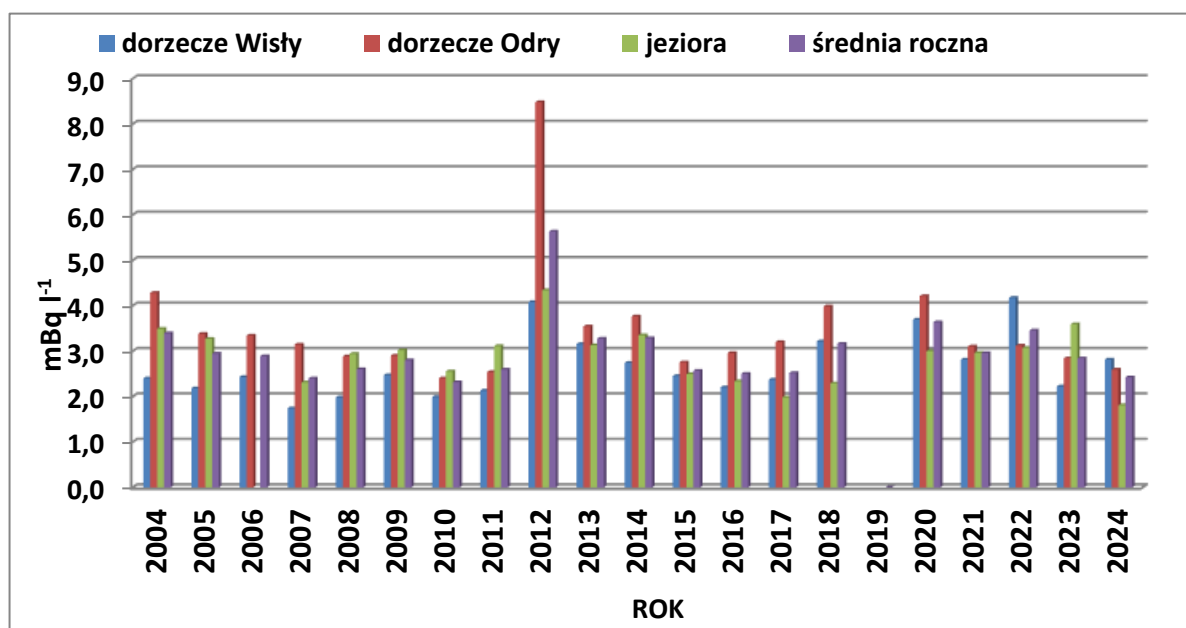
stężeń oznaczanych izotopów występowały w jeziorach i mieściły się w zakresie od 0,54 do 779,92 mBq kg⁻¹.

Stężenie promieniotwórcze ²³⁸Pu w osadach dennych było w większości przypadków poniżej granicy detekcji (1,5 mBq kg⁻¹). Zostało oznaczone tylko w 9 spośród 24 próbek osadów rzecznych (Tabela 11.) i w 2 spośród 12 próbek osadów jeziornych (jezioro Rogóźno: wiosną - 30,91 ± 3,37 mBq kg⁻¹ oraz jesienią - 8,54 ± 2,20 mBq kg⁻¹).

6. ZMIANY WARUNKÓW RADIOLOGICZNYCH NA PRZESTRZENI LAT

Zmiany warunków radiologicznych przedstawiono w układzie dorzeczy rzek w porównaniu do jezior na przestrzeni dostępnych lat pomiarowych.

6.1. 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 2004-2024

Rysunek 3. przedstawia wykres obrazujący średnie roczne stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs w wodzie dla dorzecza Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w latach 2004-2024. W roku 2019 badania prowadzone były tylko dla jednego (jesiennego) poboru stąd brak wartości średnich rocznych.

Najniższe wartości średniego rocznego stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs w latach 2004-2015 obserwujemy dla dorzecza Wisły. Natomiast od 2017 do 2020 roku najniższe

wartości 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.

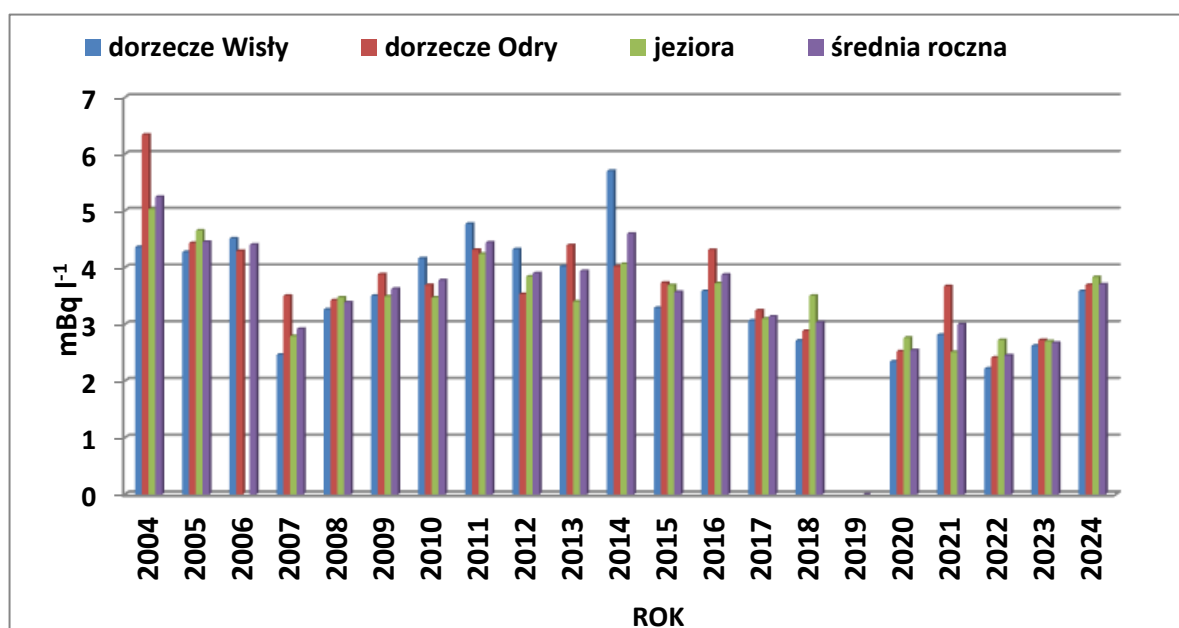
Wpływ na podwyższenie wartości średniej miał również otrzymany wynik dla próbki osadu pobranego wiosną w Chałupkach ($40,72 \text{ mBq l}^{-1}$). Jesienią oznaczona zawartość ^{137}Cs była już dziesięciokrotnie niższa. W przedziałach czasowych 2013-2014 i 2015-2017 obserwujemy wyrównany poziom stężenia 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. Po roku 2017 nastąpił wzrost średnich rocznych zawartości ^{137}Cs dla dorzeczy i jezior w stosunku do kilku wcześniejszych lat. Biorąc pod uwagę ok.15% błąd oznaczenia można stwierdzić, że średnia zawartość ^{137}Cs w wodach rzek i jezior zarówno w 2023 roku jak i kilku ubiegłych latach jest na zbliżonym poziomie.

W bieżącym roku obserwujemy nieznaczny spadek średniego rocznego stężenia izotopu cezu w stosunku do poprzedniego roku.

6.2. 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 w latach 2004-2024. W roku 2019 badania prowadzone były tylko dla jednego (jesiennego) poboru stąd brak wartości średnich rocznych.

W przypadku ^{90}Sr na przestrzeni dwudziestu 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 . Szczególnie widoczne jest to w ubiegłym jak i bieżącym roku.



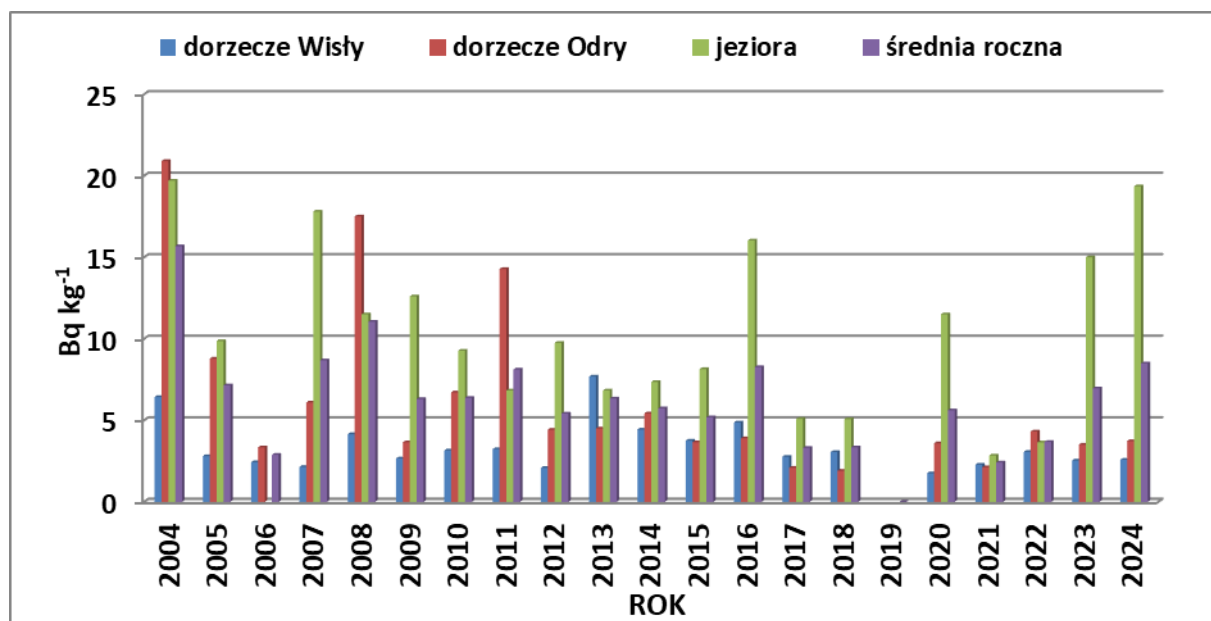
Rys. 4. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2024

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 promieniotwórczego ^{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 2020 roku odnotowano nieznaczny spadek zawartości badanego izotopu, w stosunku do ubiegłych lat, zarówno dla dorzeczy jak i jezior. W 2021 roku zauważalny jest niewielki wzrost zawartości izotopu strontu w dorzeczu Odry, co miało nieznaczny wpływ na wartość średniej, utrzymującej się na zbliżonym poziomie od kilku lat.

W roku bieżącym średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior były wyższe niż w roku ubiegłym jednocześnie pozostając na bardzo wyrównanym poziomie.

6.3. 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 dorzecza Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w latach 2004-2024.



Rys. 5. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2024

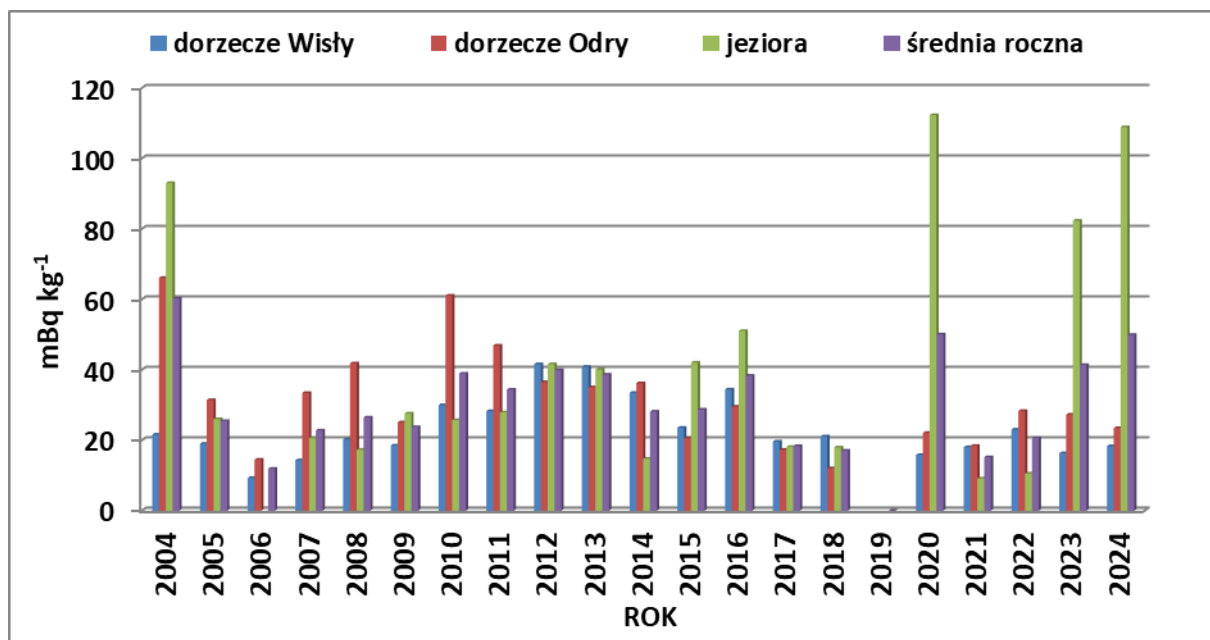
W ocenie ogólnej średniej rocznej zawartości ^{137}Cs w osadach dennych pomijamy rok 2006, ponieważ w tym roku nie były monitorowane jeziora oraz rok 2019, ponieważ w tym roku przeprowadzono tylko pobór jesienny.

Najwyższe średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych zanotowano w roku 2004 i w roku bieżącym. W roku 2004 średnie roczne stężenia wynosiły wówczas odpowiednio: dla dorzecza Wisły – 6,4 Bq kg⁻¹, dla dorzecza Odry - 20,9 Bq kg⁻¹ i dla jezior – 19,7 Bq kg⁻¹. Natomiast w 2024 oznaczono odpowiednio stężenia: dla dorzecza Wisły – 2,6 Bq kg⁻¹, dla dorzecza Odry – 3,7 Bq kg⁻¹ i dla jezior – 19,4 Bq kg⁻¹. Największy wpływ na wartość średniej w tym roku miały tak naprawdę stężenia oznaczone zarówno wiosną jak i jesienią dla jeziora Rogóźno (92,6 i 113,4 Bq kg⁻¹). Najbardziej zbliżone średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs zanotowano jeszcze kilkakrotnie; dla jezior w roku 2007

(12,6 Bq kg⁻¹), 2016 (16,0 Bq kg⁻¹) i 2023 (15,0 Bq kg⁻¹), dla dorzecza Wisły w 2013 (7,7 Bq kg⁻¹), a dla dorzecza Odry w roku 2008 (17,5 Bq kg⁻¹).

W większości przypadków w latach monitoringu zawartość ¹³⁷Cs była znacznie niższa dla dorzecza Wisły niż dorzecza Odry i jezior. W roku 2013 nie obserwuje się tej zależności. W 2022 roku na wyższą wartość średniej rocznej stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs dla dorzecza Wisły w stosunku do pozostałych lat, miał wpływ wynik otrzymany dla próbki osadu pobranego wiosną w Krakowie Tyńcu (63,75 Bq kg⁻¹). Wszystkie wartości średnich rocznych stężeń ¹³⁷Cs są najbardziej zbliżone dla danych z roku 2021. Natomiast ogólna średnia roczna zawartości ¹³⁷Cs w osadach dennych osiągnęła niemal identyczną wartość w latach 2017, 2018 i wynosiła odpowiednio: 3,35 Bq kg⁻¹ i 3,40 Bq kg⁻¹ (z pominięciem roku 2006, w którym nie były monitorowane jeziora). W roku 2020, 2023 i 2024 uzyskano znacznie wyższą wartość średnią dla osadów jeziornych niż w latach 2017 i 2018 oraz 2021 i 2022. Wpływ na taką wartość w każdym roku miały wyniki uzyskane zarówno wiosną jak i jesienią dla jeziora Rogóźno. W 2021 roku otrzymano jedne z najniższych wartości średnich dla dorzeczy i jezior na przestrzeni wszystkich lat. Ponadto wartości te są na bardzo zbliżonym poziomie.

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



Rys. 6. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{239,240}Pu w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2024.

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 2004-2024.

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 średniego rocznego stężenia izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ na przestrzeni wszystkich lat obserwacji mieszczą się w zakresie 25 mBq kg^{-1} .

Najwyższe średnie stężenia $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych obserwowano w roku 2004, 2020, 2023 i 2024 dla jezior ($93,0 \text{ mBq kg}^{-1}$, $112,3 \text{ mBq kg}^{-1}$, $82,32 \text{ mBq kg}^{-1}$, $108,9 \text{ mBq kg}^{-1}$) 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^{-1} . Taka sytuacja miała miejsce jeszcze w roku 2017, 2018 i 2021 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 (np.: oznaczenia dla osadów jeziora Rogóźno w roku 2020, 2023 i 2024). 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 2021 odnotowano najniższą wartości ogólnej średniej rocznej izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych, a wynosiła ona $15,18 \text{ mBq kg}^{-1}$ (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. W 2021 roku taka sytuacja nie miała miejsca. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach miało najniższą wartość na przestrzeni wszystkich lat badawczych. W 2022 roku odnotowaliśmy wzrost stężenia badanych izotopów dla dorzecza Wisły i Odry przy niezmiennym poziomie dla jezior. W bieżącym roku odnotowaliśmy wzrost stężenia badanych izotopów w wodach jeziornych. Było to spowodowane oznaczeniem wyższych wartości zarówno wiosną ($779,92 \text{ mBq kg}^{-1}$) jak i jesienią ($481,09 \text{ mBq kg}^{-1}$) dla osadów pobranych z jeziora Rogóźno.

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

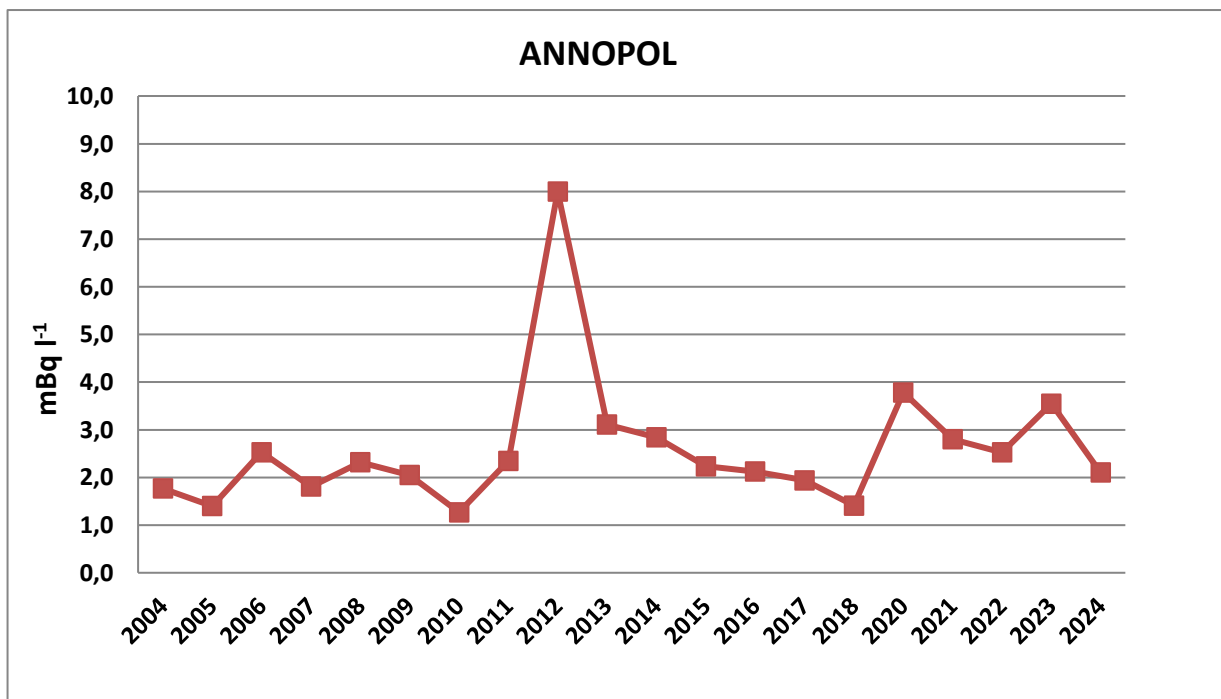
Zmiany warunków radiologicznych na przestrzeni lat przedstawiono dla czterech wybranych punktów pomiarowych zlokalizowanych: w dorzeczu Wisły (Annopol, Kraków(Tyniec), Warszawa i Płock) i na dwóch jeziorach Wigry i Wadąg. Przedstawione w rozdziale wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Aby była możliwość porównania wartości parametrów w poszczególnych latach w danym punkcie poboru, ale również pomiędzy punktami na wykresach została zachowana ta sama skala dla poszczególnych izotopów.

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

7.1.1. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Wisły w Annopolu

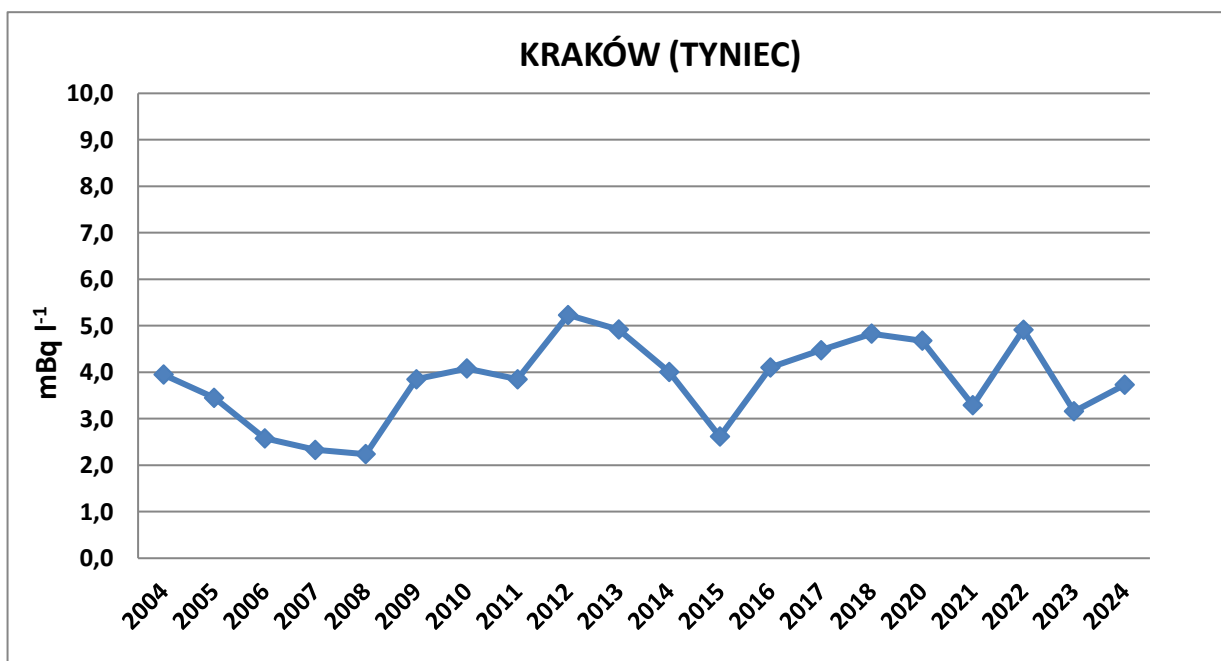
Rysunek 7. Przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Annopolu w latach 2004-2024. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs mieści się w wąskim zakresie od 1,3 (rok 2010) do $3,8 \text{ mBq kg}^{-1}$ (rok 2020). Wyjątek stanowi roku 2012, gdzie zanotowano trzykrotny wzrost zawartości stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs . Badania wykonane w kolejnych latach nie potwierdziły

jednak trwałość tej zmiany. W bieżącym roku oznaczono jedno z najmniejszych średnich rocznych stężeń ^{137}Cs w wodzie pobieranej w Annopolu na przestrzeni 20 lat ($2,11 \text{ mBq kg}^{-1}$).



Rys. 7. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2024

7.1.2. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Wisły w Krakowie



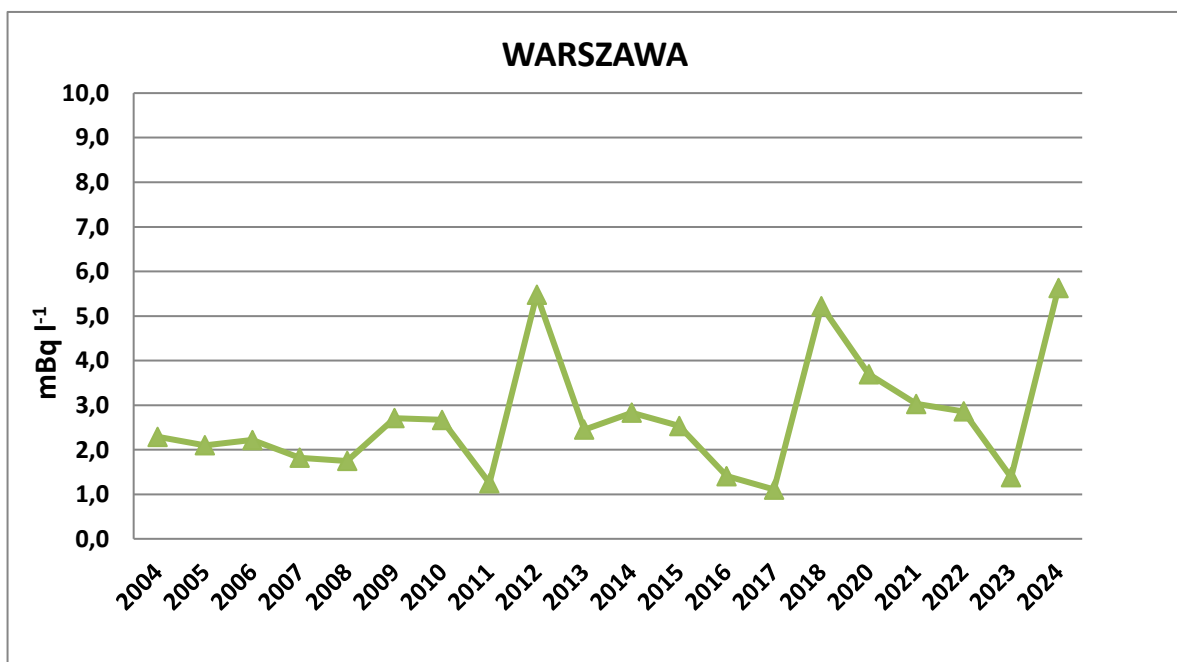
Rys. 8. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranych w Krakowie w latach 2004-2024

Rysunek 8. Przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Krakowie w latach 2004-2024. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

W początkowych latach najwyższy średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs zanotowano w pierwszym roku obserwacji. W kolejnych latach średnia zawartość ^{137}Cs w wodach ulegała zmianom. W latach 2009 – 2014 oraz 2016 – 2020 obserwowaliśmy nieznaczny wzrost stężenia promieniotwórczego badanego izotopu, przy czym najwyższe stężenie odnotowano roku 2012 – $5,2 \text{ mBq l}^{-1}$. W latach 2021 – 2024 można zauważyć niewielkie fluktuacje bez jednoznacznych tendencji. Należy jednak podkreślić, że pomimo zaobserwowanych zmian zawartość ^{137}Cs w badanej wodzie pozostaje na niskim poziomie i mieści się w zakresie 3 mBq l^{-1} .

7.1.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Wisły w Warszawie

Średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs w wodzie pobieranej z Wisły w Warszawie w latach 2004-2024 przedstawia Rysunek 9. W pierwszych latach obserwacji zanotowano niski i bardzo wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs .



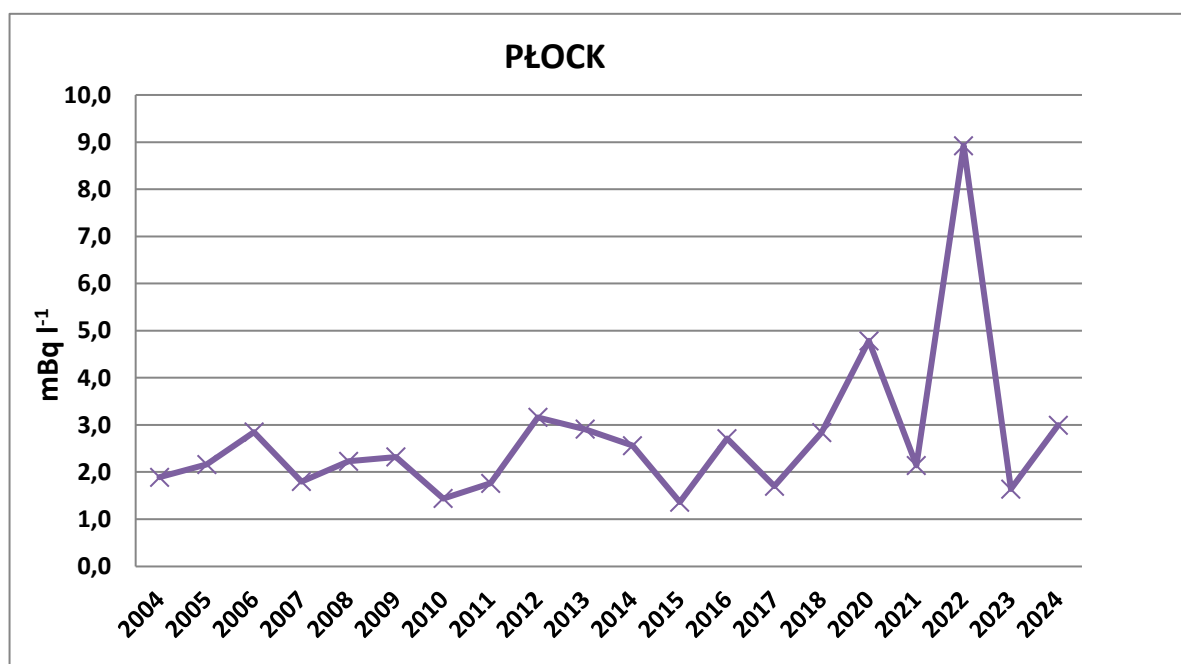
Rys. 9. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranych w Warszawie w latach 2004-2024

Od roku 2011 obserwujemy większe fluktuacje. Najwyższą wartość izotopu cezu zanotowano w 2012 i 2024 roku. Podwyższone wartości średniej rocznej ^{137}Cs w wodzie spowodowane zostały oznaczonym stężeniem promieniotwórczym tego izotopu w 2012 roku

w próbce wiosennej ($9,71 \text{ mBq l}^{-1}$), a w 2024 w próbce jesiennej ($10,42 \text{ mBq l}^{-1}$). Te pojedyncze oznaczenia można tłumaczyć czasowym wpływem wód innego pochodzenia w to miejsce. Trwałości zmiany w roku 2012 nie potwierdziły badania jesienne, w których oznaczone stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodzie wynosiło $1,25 \text{ mBq l}^{-1}$, jak również badania wykonane w kolejnych latach. Analogiczną sytuację zaobserwowano także w 2018 roku.

7.1.4. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Wisły w Płocku

W przypadku punktu poboru w Płocku występują nieznaczne zmiany zawartości izotopu ^{137}Cs w wodzie w poszczególnych latach obserwacji (Rysunek 10.). Zmiany te mieszczą się w granicach od $1,4$ do $4,8 \text{ mBq l}^{-1}$ z wyjątkiem 2022 roku, w którym średnia roczna zawartość izotopu cezu wyniosła $8,9 \text{ mBq l}^{-1}$. Trwałość tej zmiany nie została potwierdzona w kolejnych latach.

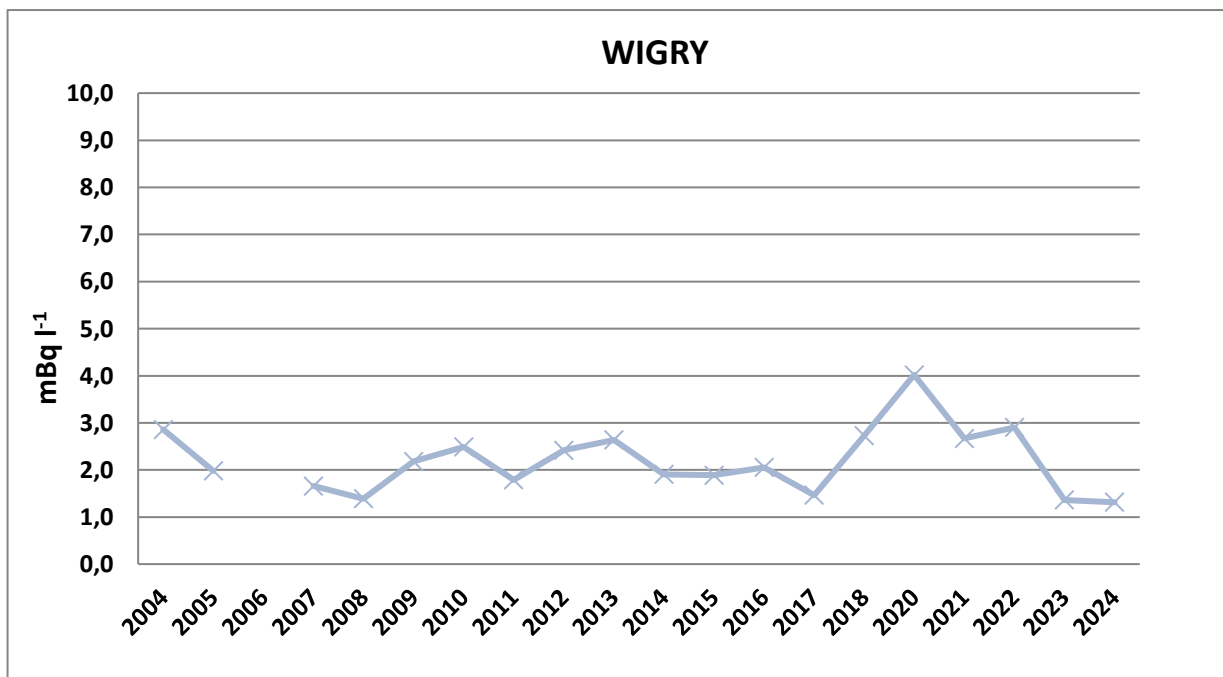


Rys. 10. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobieranych w Płocku w latach 2004-2024

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

Z przedstawionej na Rysunku 11. zależności wynika, że w przeciągu dwudziestu 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 20 lat i jest na niskim poziomie. W bieżącym roku odnotowano

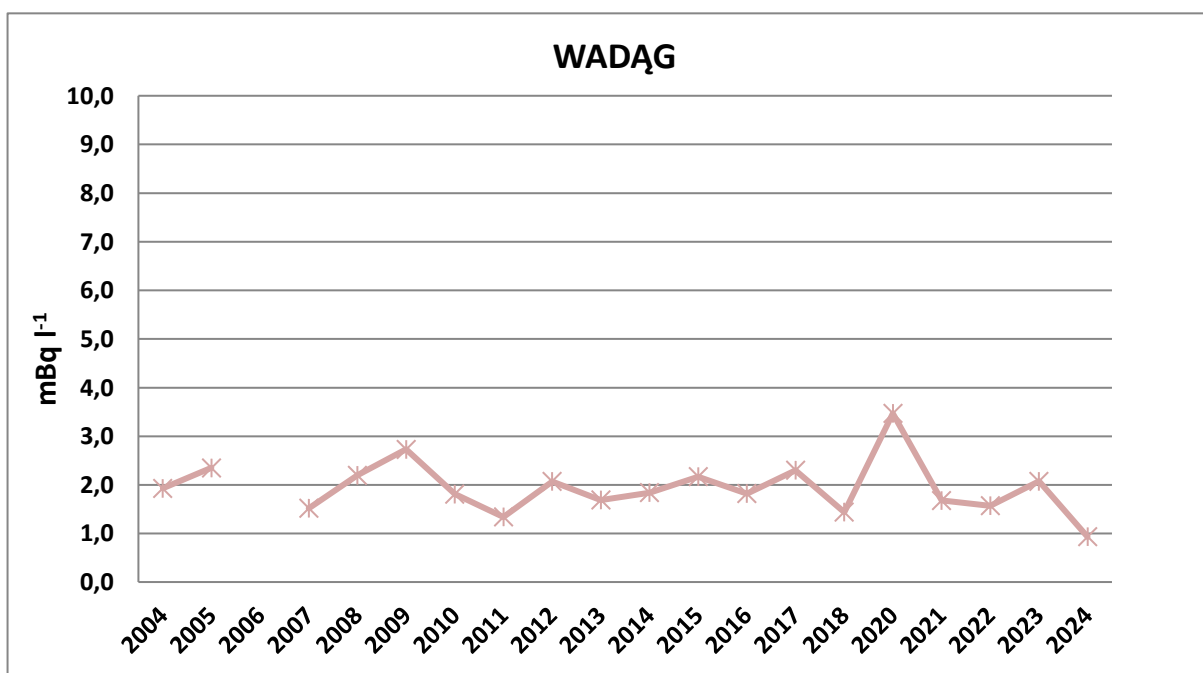
najniższe średnie roczne stężenie ^{137}Cs w wodzie pobieranej z jeziora Wigry na przestrzeni 20 lat ($1,32 \text{ mBq l}^{-1}$).



Rys. 11. Zawartość ^{137}Cs w wodach z jeziora Wigry w latach 2004-2024

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

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach jeziora Wadąg w latach 2004 – 2024 przedstawiono na Rysunku 12.



Rys. 12. Zawartość ^{137}Cs w wodach z jeziora Wadąg w latach 2004-2024

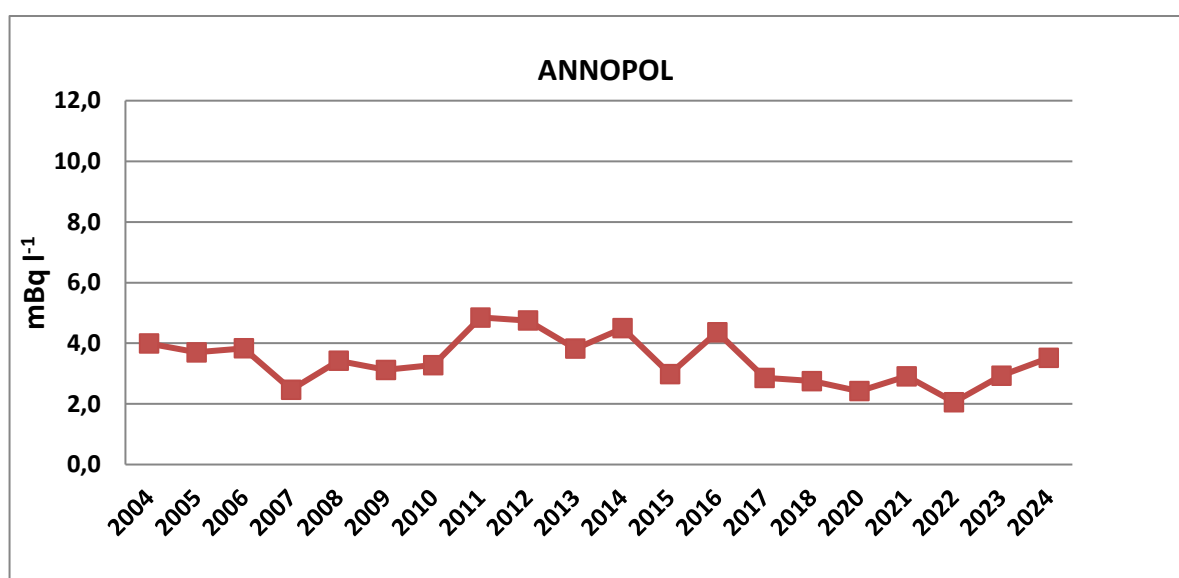
Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu wszystkich lat obserwacji zmiany zawartości ^{137}Cs w wodach były nieznaczne. Najniższą zawartość uzyskano w bieżącym roku ($0,94 \text{ mBq l}^{-1}$) najwyższą zaś w roku 2020 – $3,5 \text{ mBq l}^{-1}$. Zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. 2 mBq l^{-1} . Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{137}Cs w wodach jeziora Wadąg jest niezmienna od 20 lat i jest na niskim poziomie.

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

7.2.1. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Wisły w Annopolu

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Annopolu w latach 2004-2024 przedstawiono na Rysunku 13. Podane wartości są średnimi rocznymi w poszczególnych latach.

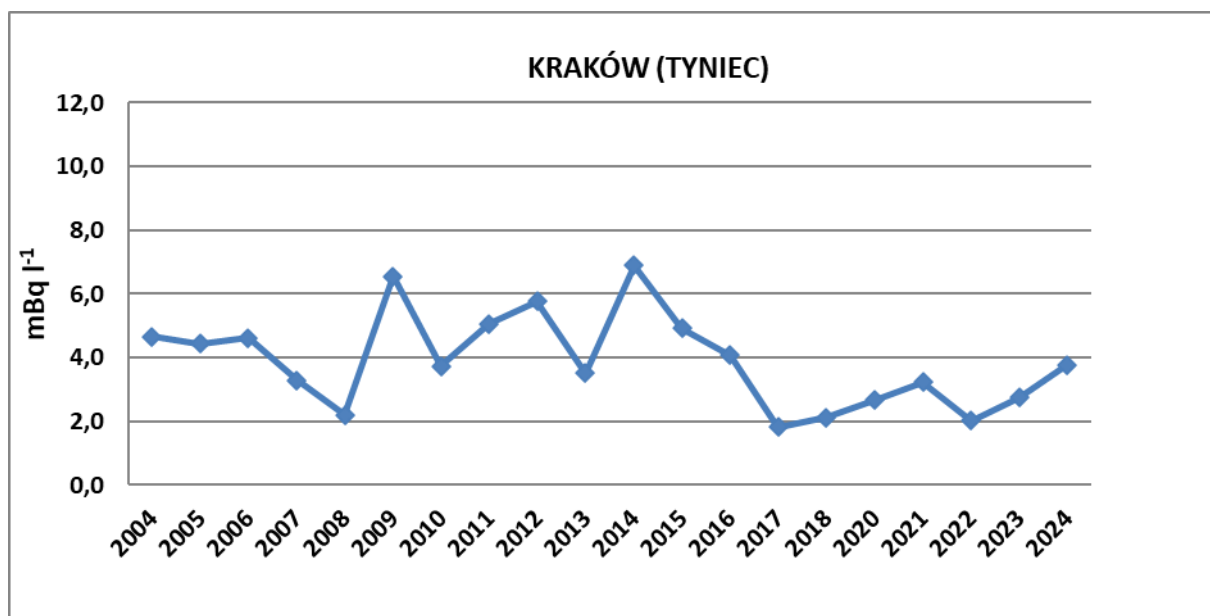
Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu dwudziestu lat zmiany zawartości ^{90}Sr w wodach były nieznaczne. Zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. $2,5 \text{ mBq l}^{-1}$. Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{90}Sr w wodach z Wisły pobieranych w Annopolu jest niezmienna od kilkudziesięciu lat i jest na niskim poziomie. Szczególnie stabilną sytuację obserwujemy w latach 2017-2023. Największą wartość średniego stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr oznaczono w 2011 roku choć wynosiła ona tylko $4,9 \text{ mBq l}^{-1}$.



Rys. 13. Zawartość ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Annopolu w latach 2004-2024

7.2.2. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Wisły w Krakowie (Tyńcu)

Rysunek 14. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Tyńcu w latach 2004-2024. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

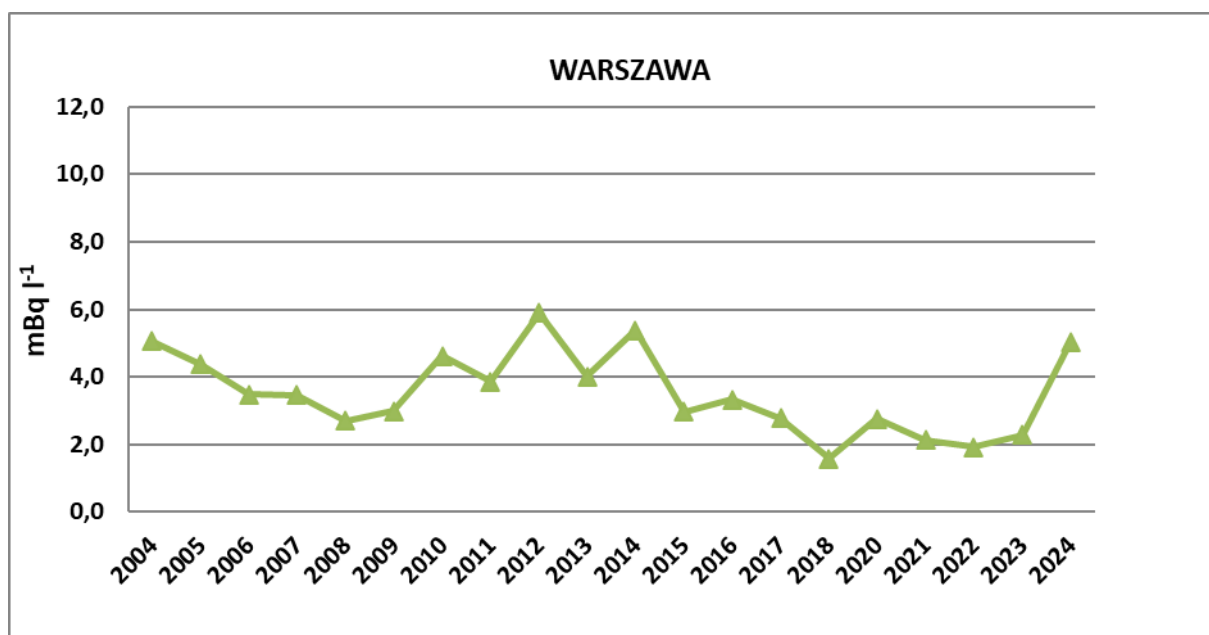


Rys. 14. Zawartość ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Krakowie w latach 2004-2024

Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr mieści się w zakresie od 1,8 (rok 2017) do 6,9 mBq l⁻¹ (rok 2014). Stężenie ^{90}Sr w latach 2004-2016 ulegało nieznacznym fluktuacjom pozostając na niskim poziomie. Bardziej stabilną sytuację obserwujemy od 2017 roku. Średnie roczne stężenie ^{90}Sr oznaczone w 2024 roku wynosiło 3,77 mBq l⁻¹.

7.2.3. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Wisły w Warszawie

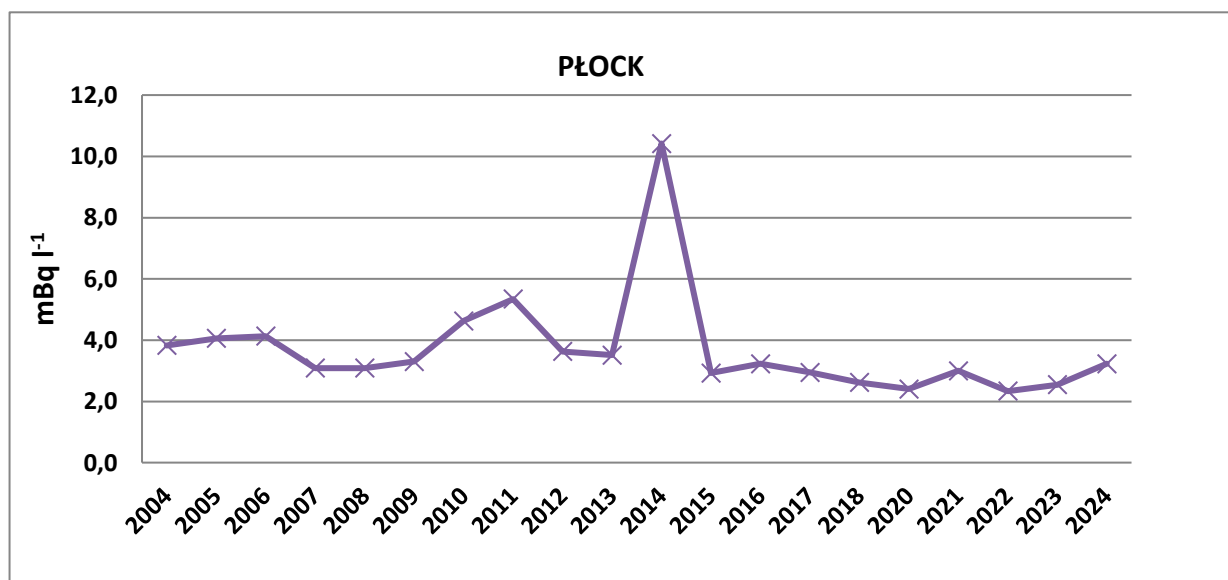
W przypadku wody pobieranej w Warszawie średnia roczna zawartość ^{90}Sr w latach 2004-2024 mieści się w zakresie od 1,6 do 5,9 mBq l⁻¹. Najbardziej stabilną sytuację obserwujemy w latach 2016 – 2023. W tym okresie oznaczono najniższe wartości stężenia monitorowanego izotopu. Maksymalną wartość stężenia promieniotwórczego strontu odnotowano w roku 2012. Jednak w stosunku do pozostałych wartości nie jest to wynik znacznie odbiegający.



Rys. 15. Zawartość ^{90}Sr w wodach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2024

7.2.4. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Wisły w Płocku

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Płocku w latach 2004-2024 obrazuje Rysunek 16. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

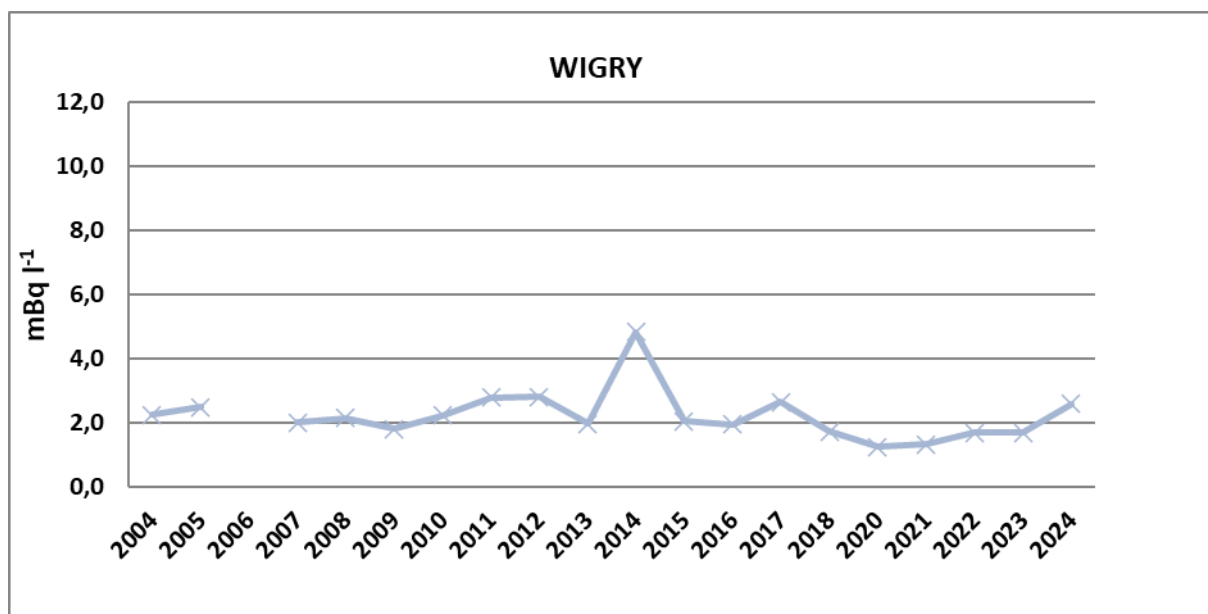


Rys. 16. Zawartość ^{90}Sr w wodach Odry pobranej w Płocku w latach 2004-2024

Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr mieści się w wąskim zakresie od 2,3 (rok 2022) do 5,3 mBq l⁻¹ (rok 2011). Wyjątek stanowi rok 2014, gdzie zanotowano

około dwukrotny wzrost zawartości stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr . Badania wykonane w kolejnych latach nie potwierdziły jednak trwałość tej zmiany, a zawartość izotopu strontu od 2015 roku jest na bardzo stabilnym, niskim poziomie. W 2024 roku wyniosła $3,23 \text{ mBq l}^{-1}$.

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

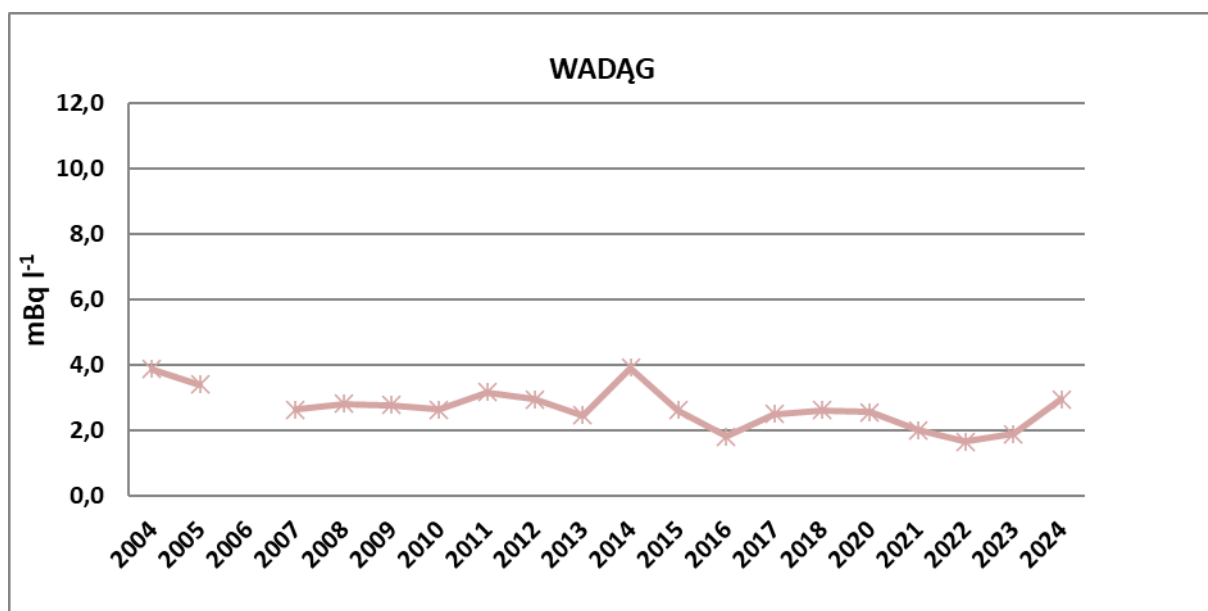


Rys. 17. Zawartość ^{90}Sr w wodach jeziora Wigry w latach 2004-2024

Podobnie jak dla ^{137}Cs średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach jeziora Wigry w latach 2004-2024 było bardzo wyrównane. Nieznaczną rozbieżność stanowi wynik otrzymany w 2014 roku, kiedy wartość stężenia wzrosła dwukrotnie, pozostając jednak na bardzo niskim poziomie. Kilkakrotnie uzyskano wartości mniejsze od 2 mBq l^{-1} , w roku bieżącym wartość średniej rocznej stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr wyniosła $2,60 \text{ mBq l}^{-1}$.

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

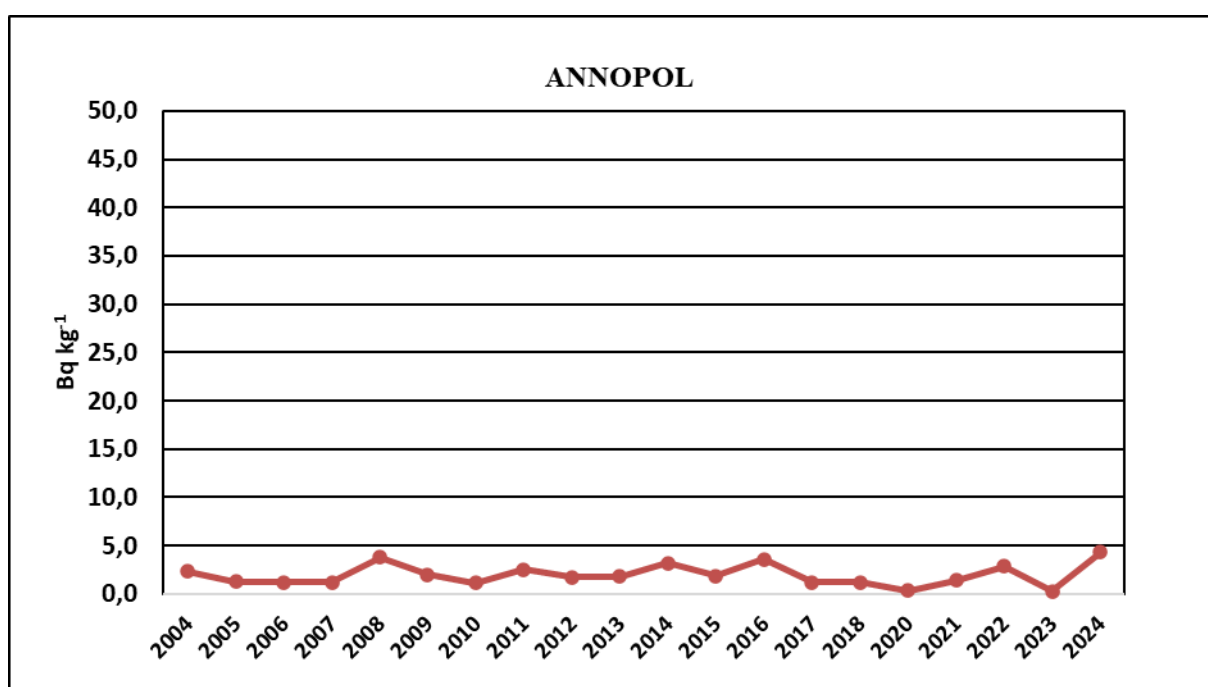
Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w badanych wodach pobieranych z jeziora Wadąg były na wyrównanym poziomie i zawierały się w granicach od $1,7 \text{ mBq l}^{-1}$ (2022 rok) do $3,9 \text{ mBq l}^{-1}$ (2004 i 2014 rok). Zmiany zawartości ^{90}Sr w wodach na przestrzeni dwudziestu lat były niewielkie, podobnie jak w przypadku izotopu cezu, przy nieznacznie większej ilości ^{90}Sr w stosunku do ^{137}Cs . Najmniejsze różnice w stężeniach obserwowano w latach 2007 – 2013. W bieżącym roku średnia zawartość ^{90}Sr wyniosła $2,95 \text{ mBq l}^{-1}$.



Rys. 18. Zawartość ^{90}Sr w wodach jeziora Wadąg w latach 2004-2024

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

7.3.1. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Wisły w Annopolu



Rys. 19. Zawartość ^{137}Cs w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2024

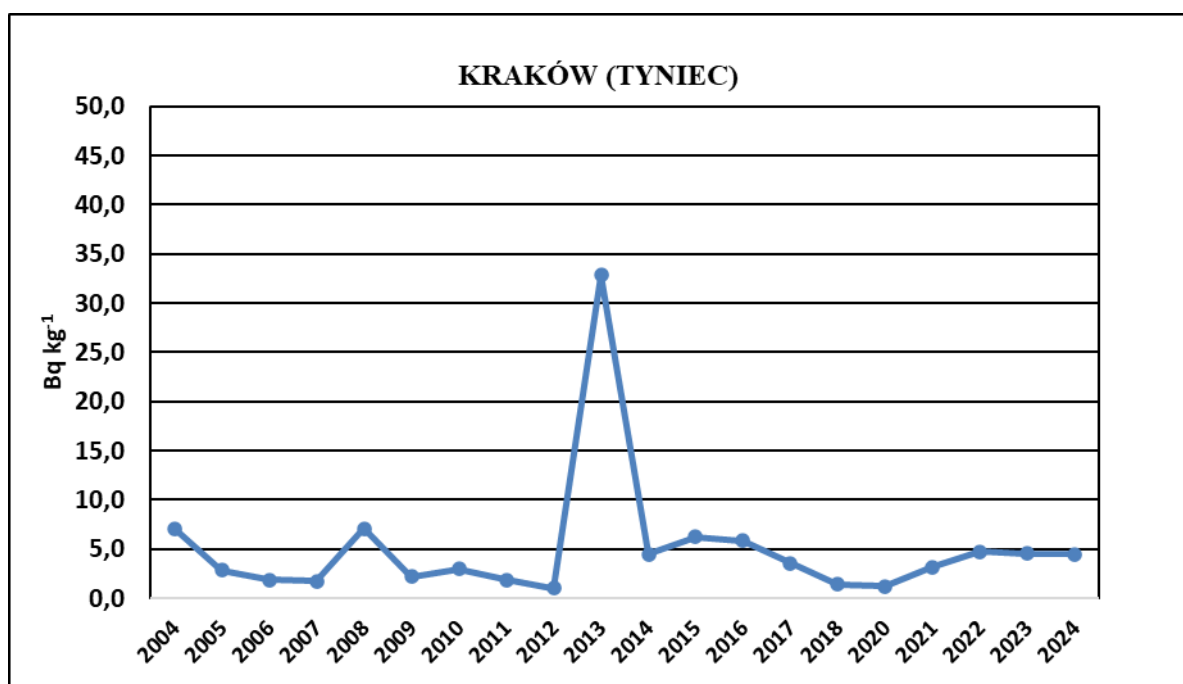
Zawartość ^{137}Cs w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2024 przedstawiona została na Rysunku 19.

Pomimo dużych zróżnicowań w poziomach wód podczas poboru prób, średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs przez wszystkie lata obserwacji było na bardzo

wyrównanym poziomie. Minimalną wartość odnotowano w roku 2023 i wynosiła ona 0,28 Bq kg⁻¹, zaś maksymalną w roku bieżącym – 4,3 Bq kg⁻¹.

7.3.2. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w osadzie pobranym z Wisły w Krakowie

W początkowych latach najwyższy średni poziom stężenia promieniotwórczego ¹³⁷Cs zanotowano w pierwszym roku badań (Rysunek 20.). Po czym obserwowano tendencję spadkową do roku 2008. W roku 2008 (jeden rok po powodzi), w analizowanym osadzie obserwowano niewielki wzrost stężeń ¹³⁷Cs spowodowany prawdopodobnie wymywaniem tego izotopu z gleby zlewiska do wody, a następnie jego kumulacją w osadzie dennym.

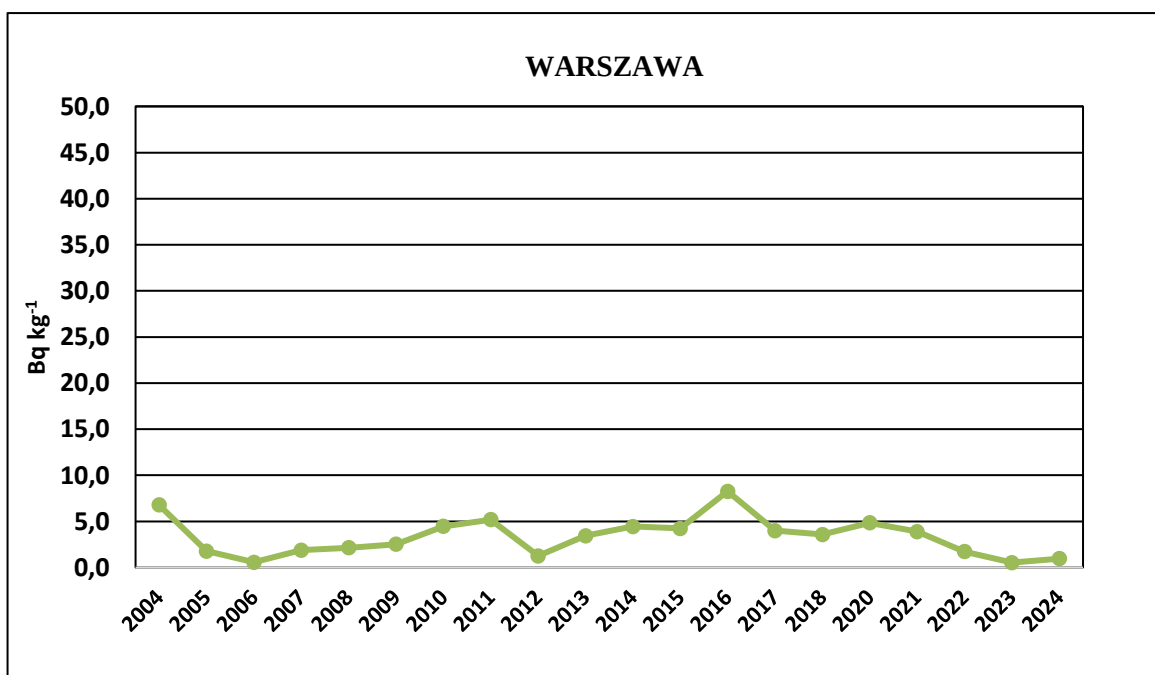


Rys. 20. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach Wisły pobranych w Krakowie w latach 2004-2024

Podwyższona średnia roczna zawartość ¹³⁷Cs w osadzie dennym w Tyńcu obserwowana w roku 2013 spowodowana została oznaczonym stężeniem tego izotopu w próbce wiosennej (63,75 Bq kg⁻¹), co można tłumaczyć czasowym naniesieniem w to miejsce innego typu osadu, który łatwiej kumulował zanieczyszczenie z wody. Trwałość tej zmiany nie potwierdziły badania jesienne, w których oznaczone stężenie ¹³⁷Cs wynosiło jedynie 1,97 Bq kg⁻¹, ani badania wykonane w kolejnych latach. Średnia roczna zawartość ¹³⁷Cs w osadzie dennym w Tyńcu w 2024 roku wynosiła 4,46 Bq kg⁻¹ i utrzymuje się na zbliżonym poziomie od 3 lat.

7.3.3. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Wisły w Warszawie

W osadach pobieranych w Warszawie, nieznacznie wyższe wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano w 2004 ($6,8 \text{ Bq kg}^{-1}$) i 2016 roku ($8,3 \text{ Bq kg}^{-1}$) obserwacji. W pozostałych latach zawartość ^{137}Cs w osadach była na niskim poziomie i jednocześnie była dosyć stabilna, a od 2020 roku obserwujemy tendencję spadkową. Najmniejsze wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs zmierzono w roku 2006 - $0,6 \text{ Bq kg}^{-1}$, 2023 – $0,53 \text{ Bq kg}^{-1}$ i w roku bieżącym - $0,97 \text{ Bq kg}^{-1}$.

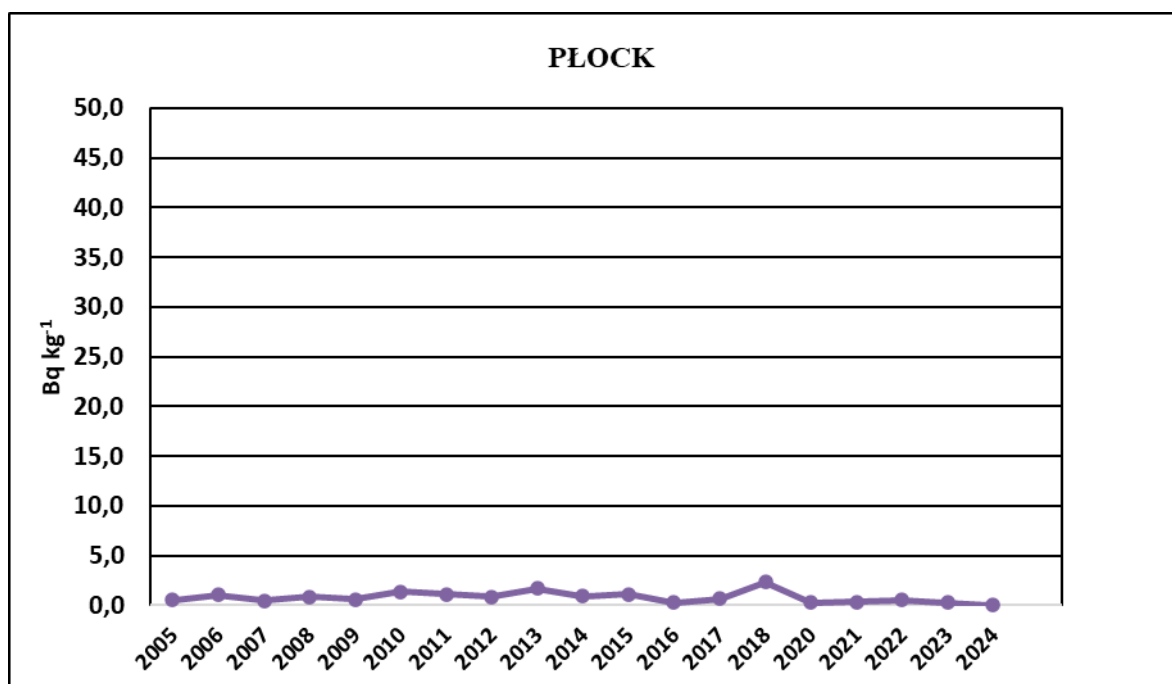


Rys. 21. Zawartość ^{137}Cs w osadach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2024

7.3.4. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Wisły w Płocku

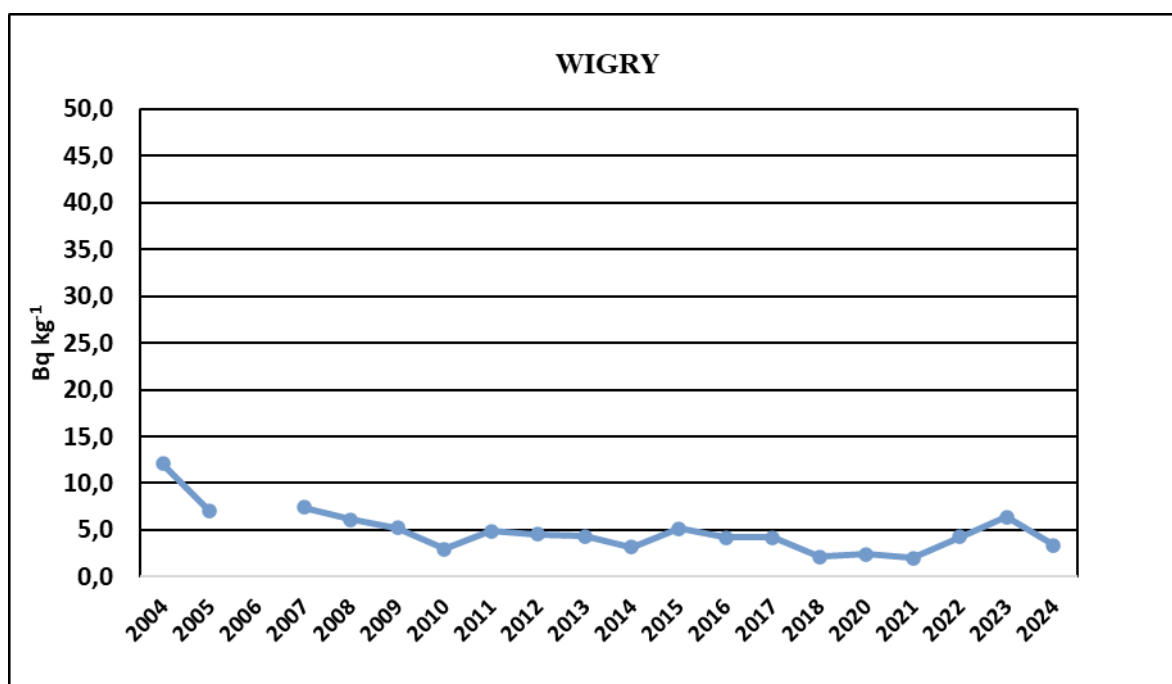
Na przestrzeni wszystkich lat badań najbardziej wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs w osadach dennych obserwowano w punkcie poboru usytuowanym w Płocku (Rysunek 22.).

Zakres zmian mieścił się od $0,2 \text{ Bq kg}^{-1}$ w roku 2016 do $2,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ w roku 2018. Prawdopodobnie spowodowane jest to bardziej stabilną sytuacją hydrologiczną niż w przypadku pozostałych punktów poboru. W bieżącym roku zawartość cezu w osadzie dennym pobranym zarówno wiosną jak i jesienią była poniżej granicy oznaczalności ($< 0,2 \text{ Bq kg}^{-1}$).



Rys. 22. Zawartość ^{137}Cs w osadach z Wisły pobranych w Płocku w latach 2004-2024

7.3.5. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z jeziora Wigry



Rys. 23. Zawartość ^{137}Cs w osadach jeziora Wigry pobranych w latach 2004-2024

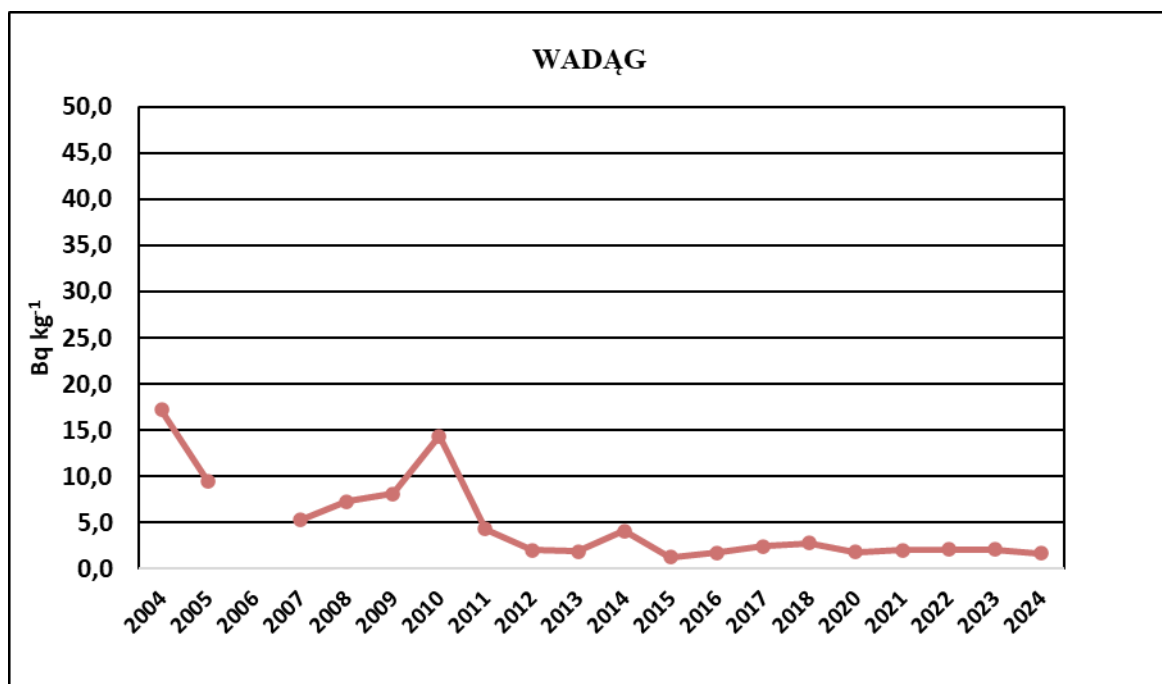
Na Rysunku 23. pokazano przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w osadach jeziora Wigry w latach 2004 – 2024. Od początku prowadzenia badań obserwujemy ogólną tendencję spadkową do roku 2010. W latach 2011 - 2021 widzimy bardzo stabilną sytuację. W tym okresie nieznaczne zmiany stężenia promieniotwórczego

^{137}Cs mieszczą się w zakresie od $2,0 \text{ Bq kg}^{-1}$ w roku 2021 do $5,2 \text{ Bq kg}^{-1}$ w roku 2015. W ostatnich trzech latach obserwacji odnotowano nieznaczny wzrost stężenia cezu.

7.3.6. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z jeziora Wadąg

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w osadach pobranych z jeziora Wadąg w latach 2004 – 2024 pokazano na Rysunku 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 naniesienie w to miejsce osadu, który łatwiej kumulował zanieczyszczenia z wody. Dodatkowo jezioro Wadąg jest jeziorem przepływowym, co również w przypadku obfitych opadów może mieć wpływ na zmiany zawartości badanych izotopów. Od roku 2011 obserwujemy stabilną sytuację. Szczególnie jest to widoczne w latach 2015 – 2024, gdzie stężenia mieszczą się w zakresie $1,5 \text{ Bq kg}^{-1}$.

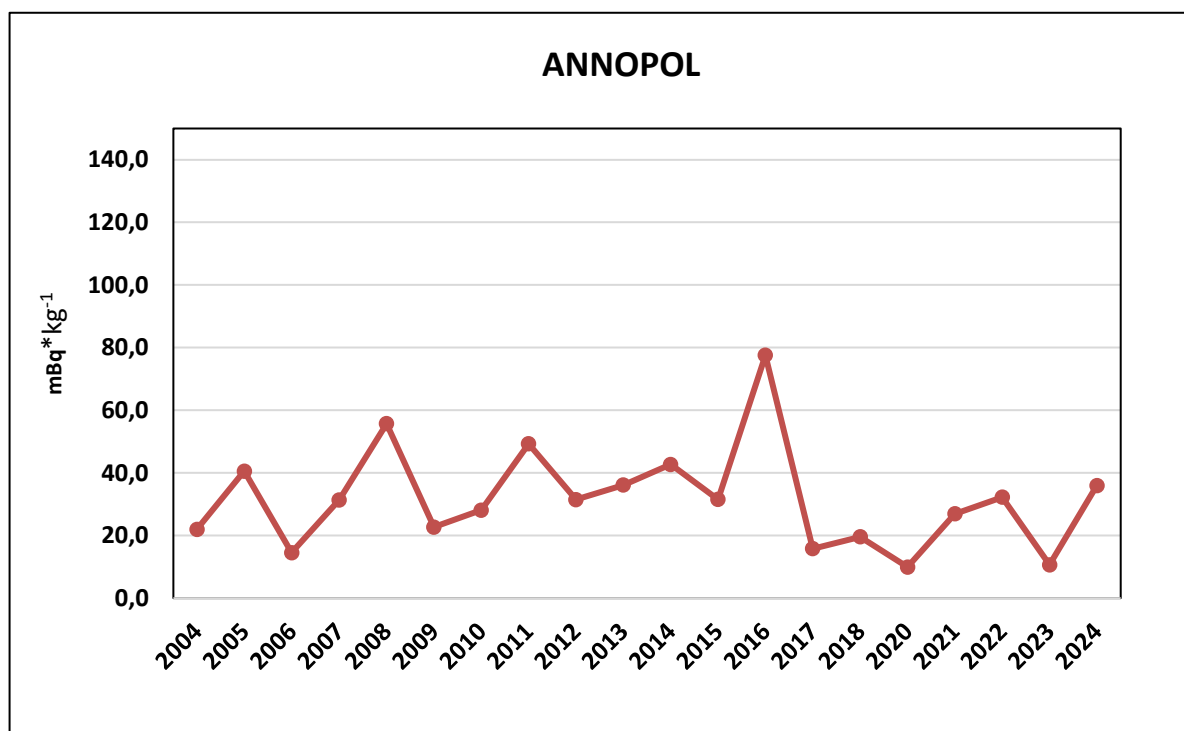


Rys. 24. Zawartość ^{137}Cs w osadach jeziora Wadąg pobranych w latach 2004-2024

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

7.4.1. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Wisły w Annopolu

Rysunek 25. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2024. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu kilkunastu lat zmiany zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach miały zmienny przebieg, lecz średnie stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ było na niskim poziomie. Nieznacznie podwyższoną średnią zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ odnotowano jedynie w osadzie pobranym w roku 2016, która wynosiła $77,5 \text{ mBq kg}^{-1}$. Od 2017 roku obserwujemy stabilną zawartość izotopów plutonu. W roku 2024 średnia roczna zawartość izotopów plutonu wynosiła $35,9 \text{ mBq kg}^{-1}$.

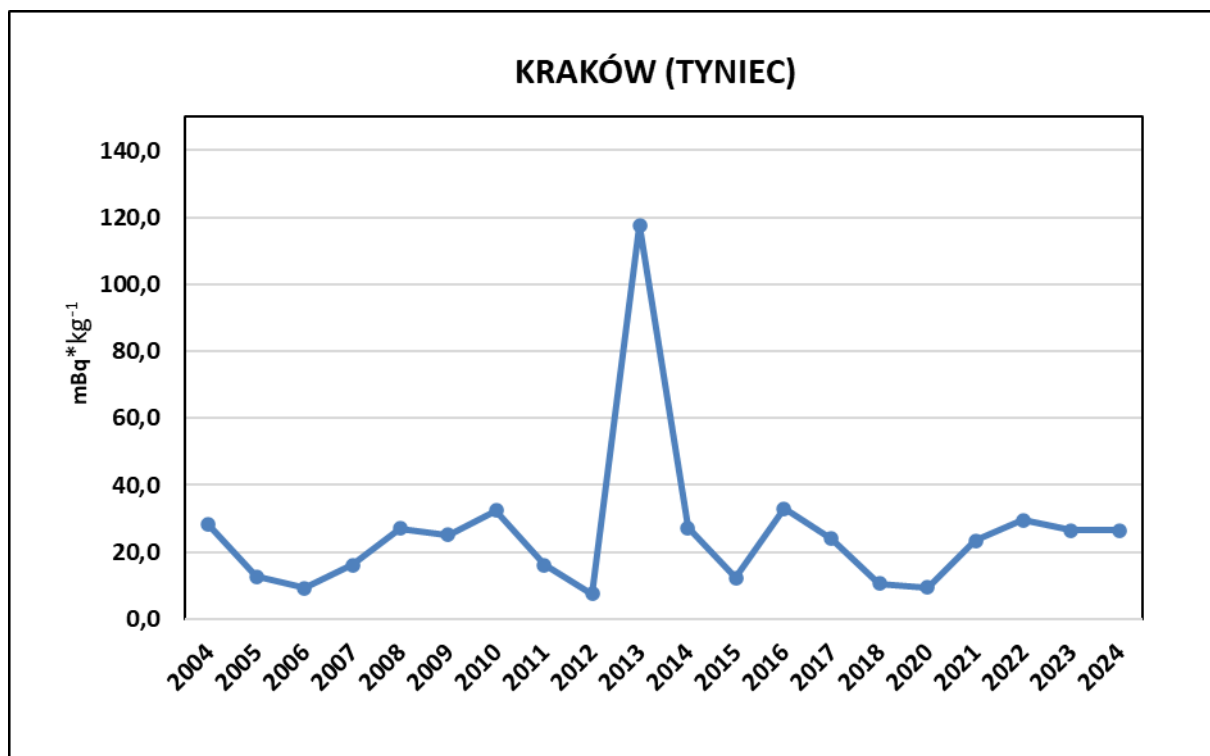


Rys. 25. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2024

7.4.2. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Wisły w Krakowie

Rysunek 26. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Tyńcu w latach 2004-2024. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Zakres średnich stężeń określonych w latach 2004-2024 zawiera się od pojedynczych mBq kg^{-1} do ok. 40 mBq kg^{-1} . Wyjątkiem jest

rok 2013, gdzie oznaczone stężenie izotopów plutonu wyniosło $117,6 \text{ mBq kg}^{-1}$. Można to tłumaczyć (podobnie jak w przypadku ^{137}Cs) czasowym naniesieniem w to miejsce innego typu osadu, który spowodował kumulację zanieczyszczenia. Należy jednak zwrócić uwagę, że wartości stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych są w porównaniu ze stężeniami ^{137}Cs co najmniej 100 razy niższe. Ostatnie cztery lata obserwacji pokazują bardzo stabilną sytuację.

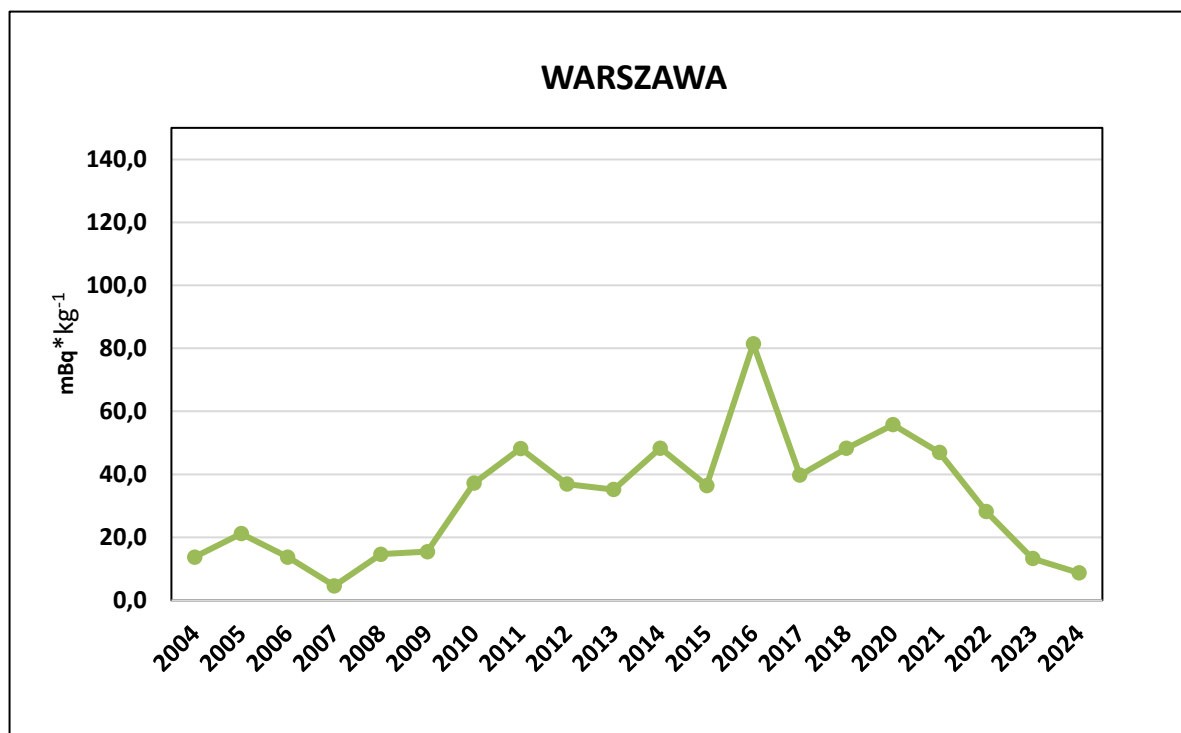


Rys. 26. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Wisły pobranych w Krakowie w latach 2004-2024

7.4.3. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Wisły w Warszawie

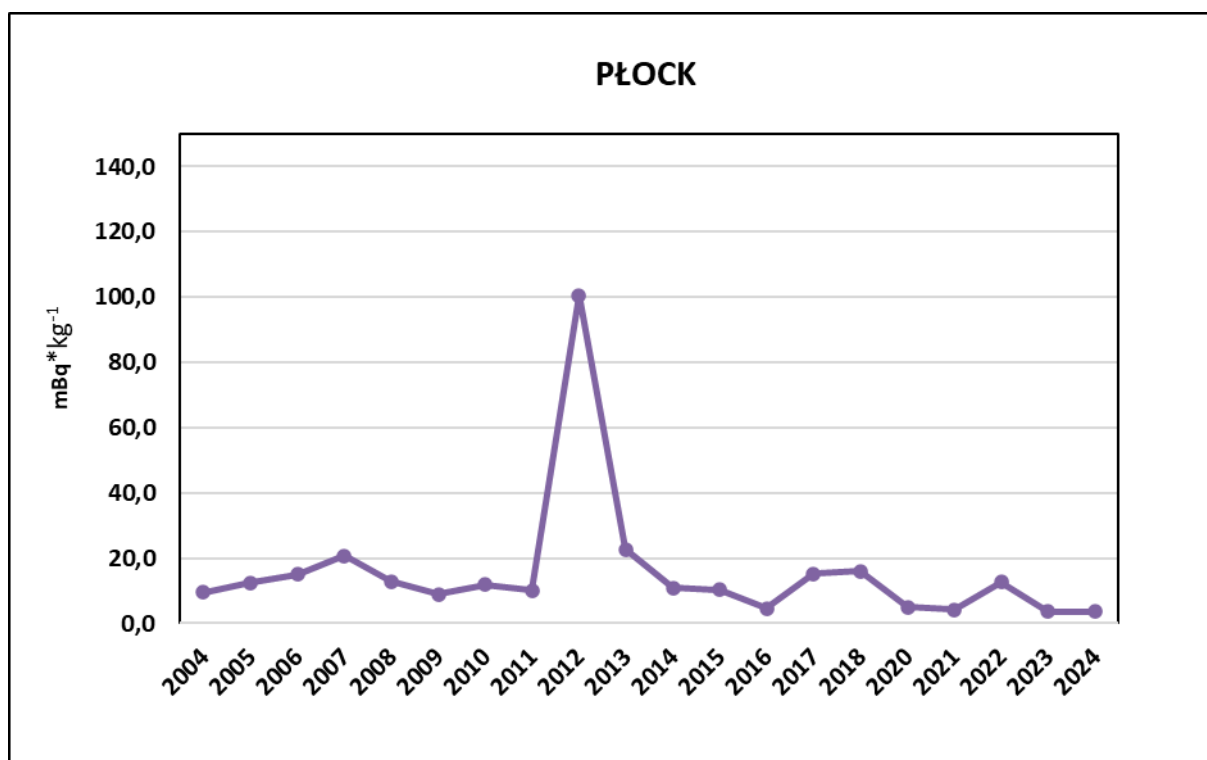
Rysunek 27. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Warszawie w latach 2004-2024.

Do roku 2009 zawartość izotopów plutonu pomimo nieznacznych fluktuacji była dosyć wyrównana i nie przekraczała 25 mBq kg^{-1} . Po tym roku nastąpił nieznaczny wzrost stężenia, a w roku 2016 stężenie $^{239,240}\text{Pu}$ wyniosło $84,3 \text{ mBq kg}^{-1}$. Przy czym podwyższone wartości odnotowano zarówno wiosną ($98,97 \text{ mBq kg}^{-1}$) jak i jesienią ($69,60 \text{ mBq/kg}$). W kolejnych latach badań zawartość izotopów plutonu wróciła do poziomu sprzed 2016 roku. Od 2020 roku obserwujemy spadek zawartości izotopów plutonu. W roku bieżącym średnia roczna zawartość izotopów plutonu wynosiła $8,71 \text{ mBq kg}^{-1}$.



Rys. 27. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2024

7.4.4. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Wisły w Płocku

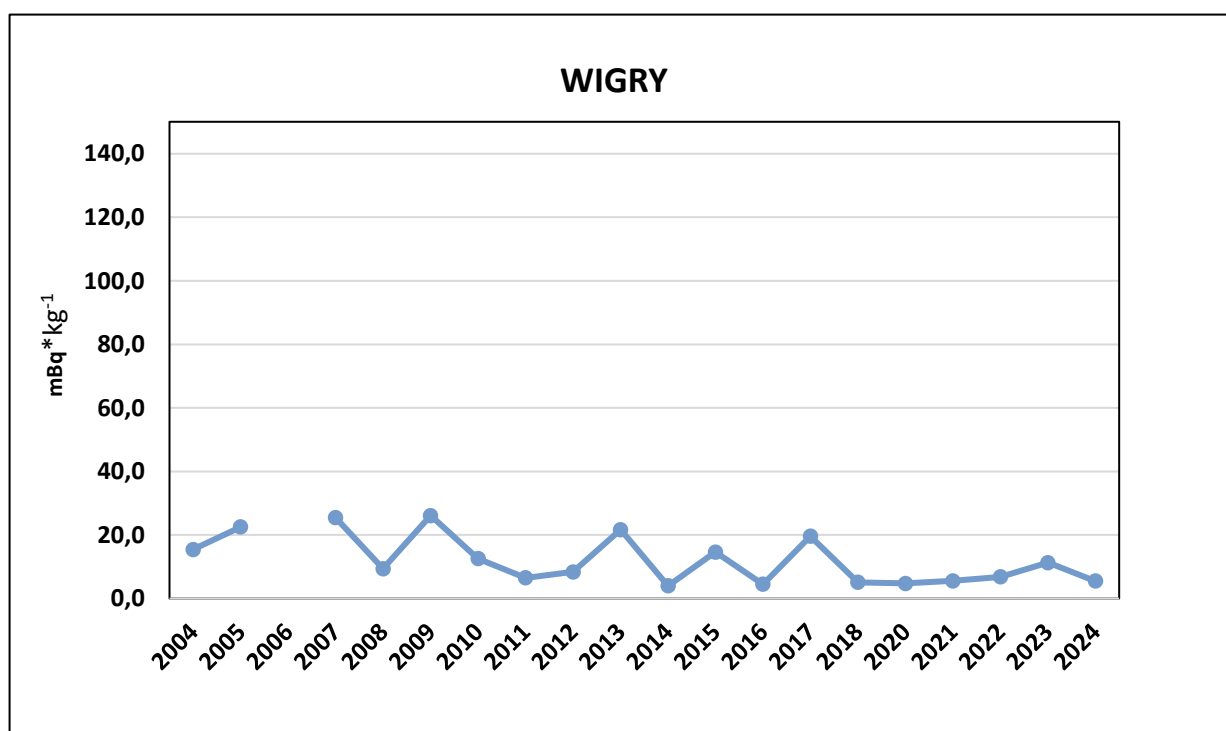


Rys. 28. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Płocku w latach 2004-2024

Średni poziom stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach pobieranych w Płocku w latach 2004-2024 był wyrównany (Rysunek 28.). Jedynie w roku 2012 zanotowano pięciokrotny wzrost zawartości izotopów plutonu. Podwyższona wartość średniego rocznego stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie spowodowana została oznaczonym stężeniem promieniotwórczym tego izotopu w próbce wiosennej ($187,58 \text{ mBq kg}^{-1}$), które można tłumaczyć naniesieniem gleb innego pochodzenia w to miejsce. Trwałości tej zmiany nie potwierdziły badania jesienne, w których oznaczone stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie wynosiło $13,6 \text{ mBq kg}^{-1}$. W bieżącym roku oznaczono izotopy plutonu na poziomie $3,7 \text{ mBq kg}^{-1}$.

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

Z przedstawionej na Rysunku 29. zależności wynika, że w przeciągu dwudziestu 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 niższych wartości w przeciągu wszystkich lat obserwacji – $5,53 \text{ mBq kg}^{-1}$.

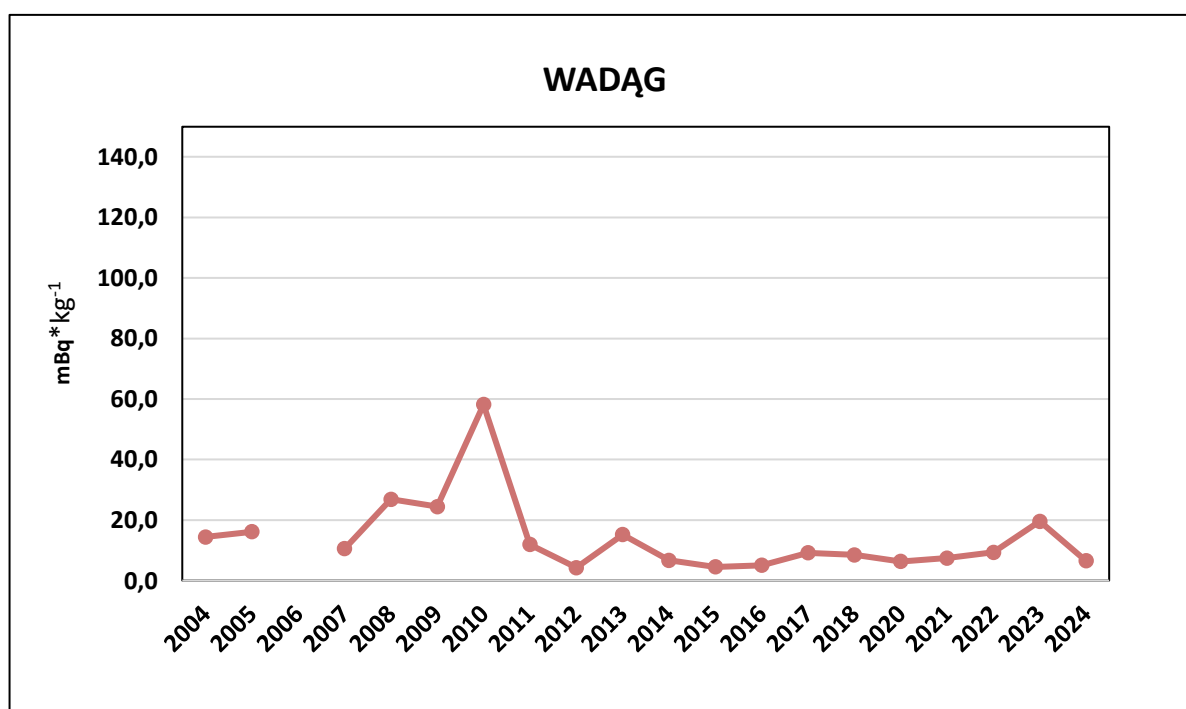


Rys. 29. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Wigry pobranych w latach 2004-2024

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

Z przedstawionej na Rysunku 30. zależności wynika, że w przeciągu wszystkich lat obserwacji stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach było 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 – 2021. W tym okresie zmiany mieszczą się w zakresie zaledwie 4 mBq kg⁻¹. W 2024 roku uzyskano jedną z niższych wartości w przeciągu dwudziestu lat obserwacji – 6,53 mBq kg⁻¹.



Rys. 30. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Wadąg pobranych w latach 2004-2024

8. PODSUMOWANIE

Monitoring skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych w 2024 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, wynikających 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 2,81 i 2,59 mBq l⁻¹. Najniższe stężenie uzyskano dla jezior 1,81 mBq l⁻¹. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior były na bardzo zbliżonym poziomie i wynosiły odpowiednio 3,58; 3,69; 3,83 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 ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$ obserwowano w osadach dennych pobranych z Wisły.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych wynosiło odpowiednio: dla dorzecza Wisły 2,58 Bq kg⁻¹, dla dorzecza Odry 3,72 Bq kg⁻¹ i dla jezior 19,35 Bq kg⁻¹.

W przypadku $^{239,240}\text{Pu}$ wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych były bardziej zbliżone dla osadów dorzecza Wisły i Odry, a wyższe dla jezior i wynosiły odpowiednio: dla dorzecza Wisły – $18,29 \text{ mBq kg}^{-1}$, dla dorzecza Odry – $23,46 \text{ mBq kg}^{-1}$ i dla jezior – $108,86 \text{ mBq kg}^{-1}$.

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 ($1,5 \text{ mBq kg}^{-1}$).

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 promieniotwórczych wszystkich analizowanych nuklidów jak i oznaczenia uzyskane dla pojedynczych próbek badanej wody i osadów dennych nie odbiegają od wyników uzyskiwanych w poprzednich latach.

9. 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 pozostają na niskim poziomie.

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