

**MONITORING PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO REALIZOWANY W
RAMACH PAŃSTWOWEGO MONITORINGU ŚRODOWISKA W LATACH
2021-2022**

ZADANIE 2:

**MONITORING SKAŻEŃ PROMIENIOTWÓRCZYCH WÓD
POWIERZCHNIOWYCH I OSADÓW DENNYCH**

ETAP II

RAPORT

Rok 2021

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



Opracowanie wykonano na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (umowa nr GIOŚ/122/2021/DMS/NFOŚ z dnia 30.06.2021 r.) finansowane ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej



Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Kwiecień 2022

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 2021 były następujące:

1. Termin wiosenny – od 30 czerwca do 14 lipca;
2. Termin jesienny – od 6 do 22 października.

SŁOWNIK STOSOWANYCH SKRÓTÓW

AMP	fosfomolibdenian amonu
Bq kg ⁻¹	bekerele 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	milibekerele na kilogram
mBq l ⁻¹	milibekerele 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

1. 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 2021	Data poboru próbek jesień 2021	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Drawsko, Stare Drawsko	<i>zachodnio-pomorskie</i>	08.07	15.10	16°11'51"	53°36'08"
Wadąg, Myki	<i>warmińsko-mazurskie</i>	30.06	06.10	20°32'35"	53°49'10"
Partęczyny, Wielkie Partęczyny	<i>kujawsko-pomorskie</i>	14.07	08.10	19°13'02"	53°28'13"
Rogóżno, Rogóżno	<i>lubelskie</i>	05.07	12.10	22°59'25"	51°22'03"
Niesłysz, Niesulice	<i>lubuskie</i>	07.07	14.10	15°24'05"	52°12'41"
Wigry, Stary Folwark	<i>podlaskie</i>	30.06	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 2021	Data poboru próbek jesień 2021	Długość geograficzna wschodnia DMS	Szerokość geograficzna północna DMS
Wisła	Kraków Tyniec	05.07	12.10	20°10'48"	50°42'50"
	Annopol	05.07	12.10	21°51'33"	50°53'10"
	Warszawa	12.07	22.10	21°00'59"	52°14'07"
	Płock	14.07	08.10	19°41'52"	52°32'50"
	Kiezmark	14.07	08.10	18°55'51"	54°15'14"
Narew	Pultusk	30.06	06.10	21°05'08"	52°42'18"
Bug	Wyszków	30.06	06.10	21°27'22"	52°36'10"
Odra	Chałupki	06.07	13.10	18°19'10"	49°55'22"
	Wrocław	06.07	13.10	16°59'31"	51°08'01"
	Głogów	06.07	13.10	16°04'55"	51°39'11"
	Krajnik	07.07	14.10	14°28'50"	53°11'44"
Warta	Poznań	08.07	15.10	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 około 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 ⁹⁰Sr dla czasu pomiaru 120 min wynosi 0,45 mBq l⁻¹.

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

Stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs 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 ⁶⁰Co (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 Bq kg⁻¹ suchej masy osadu dennego.

Zasada metody oznaczania stężenia promieniotwórczego ²³⁸Pu i ^{239,240}Pu polega na wydzieleniu plutonu z badanej próbki, elektrodepozycji i pomiarze aktywności metodą α-spektrometryczną. Analizę prowadzono w obecności znacznika (²⁴²Pu), 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 mBq/ próbkę.

3. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs I ^{90}Sr W PRÓBKACH WODY POBRANEJ W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2021 ROKU

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

Stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w próbkach wody z poszczególnych miejsc poboru próbek w rzekach w okresie wiosennym i jesiennym 2021 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu przedstawione są w Tabeli 3. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach rzek mieściły się w granicach od 1,42 mBq l⁻¹ w Narwi (Pułtusk) do 4,07 mBq l⁻¹ w Wiśle (Kiezmark). Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs dla dorzecza Odry mieścił się w przedziale od 1,87 (Odra, Krajnik) do 4,03 mBq l⁻¹ (Odra, Chałupki), a dla dorzecza Wisły od 1,42 (Narew, Pułtusk) do 4,07 mBq l⁻¹ (Wisła, Kiezmark).

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 2021 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	3,36 ± 0,43 ^{a)}	3,21 ± 0,38 ^{a)}	3,29 ± 0,11 ^{b)}
2.	Wisła Annopol	2,30 ± 0,38	3,29 ± 0,34	2,80 ± 0,70
3.	Wisła Warszawa	1,77 ± 0,28	4,26 ± 0,48	3,03 ± 1,78
4.	Wisła Płock	1,68 ± 0,29	2,60 ± 0,34	2,14 ± 0,65
5.	Wisła Kiezmark	4,07 ± 0,54	4,07 ± 0,52	4,07 ± 0,00
6.	Narew Pułtusk	1,89 ± 0,27	0,95 ± 0,14	1,42 ± 0,66
7.	Bug Wyszków	2,29 ± 0,32	3,54 ± 0,44	2,92 ± 0,88
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	3,77 ± 0,57	4,92 ± 0,41	4,03 ± 0,37
9.	Odra Wrocław	3,22 ± 0,52	2,79 ± 0,27	3,01 ± 0,30
10.	Odra Głogów	2,75 ± 0,42	3,65 ± 0,44	3,20 ± 0,64
11.	Odra Krajnik	1,81 ± 0,29	1,93 ± 0,28	1,87 ± 0,08
12.	Warta Poznań	2,46 ± 0,34	4,31 ± 0,58	3,39 ± 1,31

^{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 2021 roku.

Najwyższą wartość stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej jesienią z Warty w Poznaniu – $6,38 \text{ mBq l}^{-1}$, najniższą zaś w próbce wody pobranej również jesienią z Wisły w Warszawie – $1,90 \text{ mBq l}^{-1}$.

Tabela 4. Stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2021 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	$3,67 \pm 0,39^{\text{a}}$	$2,78 \pm 0,32$	$3,23 \pm 0,63^{\text{b}}$
2.	Wisła Annapol	$3,15 \pm 0,34$	$2,67 \pm 0,34$	$2,91 \pm 0,34$
3.	Wisła Warszawa	$2,38 \pm 0,26$	$1,90 \pm 0,22$	$2,14 \pm 0,34$
4.	Wisła Płock	$2,79 \pm 0,33$	$3,21 \pm 0,31$	$3,00 \pm 0,30$
5.	Wisła Kiezmark	$2,46 \pm 0,26$	$2,46 \pm 0,28$	$2,46 \pm 0,00$
6.	Narew Pułtusk	$2,40 \pm 0,27$	$2,64 \pm 0,27$	$2,52 \pm 0,17$
7.	Bug Wyszków	$3,32 \pm 0,35$	$3,49 \pm 0,44$	$3,41 \pm 0,12$
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	$4,25 \pm 0,46$	$2,33 \pm 0,27$	$3,29 \pm 1,36$
9.	Odra Wrocław	$3,94 \pm 0,42$	$3,65 \pm 0,40$	$3,80 \pm 0,21$
10.	Odra Głogów	$4,28 \pm 0,47$	$2,93 \pm 0,31$	$3,61 \pm 0,95$
11.	Odra Krajnik	$3,53 \pm 0,36$	$2,31 \pm 0,27$	$2,92 \pm 0,86$
12.	Warta Poznań	$3,06 \pm 0,33$	$6,38 \pm 0,58$	$4,72 \pm 2,35$

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

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych rzek mieściło się w zakresie się od $2,14 \text{ mBq l}^{-1}$ w wodzie z Wisły (Warszawa) do $4,72 \text{ mBq l}^{-1}$ w wodzie pobranej z Warty w Poznaniu.

Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr wynosi odpowiednio: dla dorzecza Wisły od 2,14 do 3,41 mBq l^{-1} , a dla dorzecza Odry od 2,92 do 4,72 mBq l^{-1} .

3.3. 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 2021 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu. Stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs oznaczone w wodach jezior mieściły się w granicach od 1,22 mBq l^{-1} wiosną w jeziorze Wielkie Partęczyny do 10,15 mBq l^{-1} w jeziorze Rogóžno jesienią. Zakres średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs wynosił od 1,68 mBq l^{-1} w jeziorze Wadąg do 7,00 mBq l^{-1} w jeziorze Rogóžno. W tym roku najwyższą średnią wartość stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs odnotowywano w próbkach wody z jeziora Rogóžno. Nie odbiega jednak znacząco od pozostałych średnich wartości stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs oznaczonego w pozostałych jeziorach. Biorąc pod uwagę ok. 15% błędu oznaczenia można stwierdzić, że średnia zawartość ^{137}Cs w wodach jezior w 2021 roku jest na wyrównanym poziomie.

Tabela 5. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach jezior w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2021 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	$2,87 \pm 0,47^{\text{a}}$	$2,47 \pm 0,25^{\text{a}}$	$2,67 \pm 0,28^{\text{b}}$
2	Wadąg Myki	$2,04 \pm 0,28$	$1,31 \pm 0,20$	$1,68 \pm 0,52$
3	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$1,22 \pm 0,18$	$2,37 \pm 0,28$	$1,80 \pm 0,0,81$
4	Drawsko Stare Drawsko	$1,68 \pm 0,24$	$2,94 \pm 0,32$	$2,31 \pm 0,89$
5	Niesłysz Niesulice	$2,07 \pm 0,35$	$2,56+ \pm 0,0,27$	$2,32 \pm 0,35$
6	Rogóžno Rogóžno	$3,84 \pm 0,51$	$10,15 \pm 0,91$	$7,00 \pm 4,46$

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

^{b)}Wartość średnia \pm 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 2021 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	1,51 ± 0,18 ^{a)}	1,12 ± 0,12 ^{a)}	1,32 ± 0,28 ^{b)}
2	Wadąg Myki	2,28 ± 0,25	1,73 ± 0,23	2,01 ± 0,86
3	Wielkie Partęcz. Partęczyny	1,97 ± 0,22	1,73 ± 0,19	1,85 ± 0,17
4	Drawsko Stare Drawsko	2,85 ± 0,30	2,15 ± 0,24	2,50 ± 0,49
5	Niesłysz Niesulice	1,80 ± 0,22	1,49 ± 0,21	1,65 ± 0,22
6	Rogóżno Rogóżno	8,47 ± 0,84	3,05 ± 0,32	5,76 ± 3,83

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

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

Stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach z poszczególnych miejsc poboru w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym 2021 roku oraz średnie roczne stężenie promieniotwórcze tego radionuklidu przedstawia Tabela 6.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach badanych jezior wahało się od 1,32 mBq l⁻¹ w wodzie z jeziora Wigry do 5,76 mBq l⁻¹ w wodzie pobranej z Rogóżna. Najwyższą wartość stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr odnotowano w próbce wody pobranej wiosną z jeziora Rogóżno – 8,47 mBq l⁻¹, najniższą zaś w próbce wody jesienią z jeziora Wigry – 1,12 mBq l⁻¹. Niezmiennie od wielu lat najwyższe wartości stężenia promieniotwórczego ^{90}Sr notuje się w próbkach wody z jeziora Rogóżno. W roku 2021 także oznaczono najwyższe wartości stężenia promieniotwórczego ^{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 były na bardzo zbliżonym poziomie i wynosiły odpowiednio: 2,81; 3,10; 2,96 mBq l^{-1} .

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs oznaczono w wodach jeziornych w okresie wiosennym i wynosiło ono 2,29 mBq l^{-1} , najwyższe jesienią również w wodach jeziornych – 3,63 mBq l^{-1} .

Najmniejsze różnice w stężeniach promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano dla wód dorzecza Odry (1,81–4,31 mBq l^{-1}), największe dla wód jeziornych (1,22–10,15 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 2021 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)}	2,48 ± 0,90 ^{b)}	3,14 ± 3,14 ^{b)}	2,81 ± 1,03 ^{b)} (14)	0,95 – 4,29
Dorzecze Odry (5)	2,80 ± 0,74	3,39 ± 1,03	3,10 ± 0,90 (10)	1,81 – 4,31
Jeziora (6)	2,29 ± 0,93	3,63 ± 3,24	2,96 ± 2,38 (12)	1,22 – 10,15
Średnia ogólna (18)	2,51 ± 0,85	3,37 ± 1,95	2,94 ± 1,55 (36)	0,95 – 10,15

^{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 2021r.

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)}	2,88 ± 0,51 ^{b)}	2,74 ± 0,51 ^{b)}	2,81 ± 0,50 ^{b)} (14)	1,90 - 3,67
Dorzecze Odry (5)	3,81 ± 0,52	3,52 ± 1,69	3,67 ± 1,19 (10)	2,31 – 6,38
Jeziora (6)	3,15 ± 2,65	1,88 ± 0,67	2,51 ± 1,96 (12)	1,12 – 8,47
Średnia ogólna (18)	3,23 ± 1,54	2,67 ± 1,15	2,95 ± 1,37 (36)	1,12 – 8,47

^{a)} Liczba próbek wody

^{b)} Wartość średnia ± OS

Najniższe średnie stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr oznaczono w wodach jeziornych w okresie jesiennym i wynosiło ono $1,88 \text{ mBq l}^{-1}$, najwyższe wiosną w wodach dorzecza Odry – $3,81 \text{ mBq l}^{-1}$.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w dorzeczu Wisły i jeziorach było na bardzo zbliżonym poziomie i wynosiło odpowiednio $2,81 \text{ mBq l}^{-1}$ i $2,51 \text{ mBq l}^{-1}$. Dla dorzecza Odry średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr było wyższe i wynosiło $3,67 \text{ mBq l}^{-1}$ (Tabela 8.) Najmniejsze różnice w stężeniach ^{90}Sr (zakres $1,90 - 3,67 \text{ mBq l}^{-1}$) odnotowano dla wód dorzecza Wisły, największe dla wód jeziornych (zakres $1,12 - 8,47 \text{ mBq l}^{-1}$).

3.7. Analiza zależności pomiędzy zawartościami ^{137}Cs i ^{90}Sr w próbkach badanych w 2021 roku

Tabela 9. przedstawia średnie roczne wartości stosunku stężenia ^{90}Sr do ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły, dorzecza Odry i jezior w 2021 roku.

Stosunek średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr do ^{137}Cs w próbkach wody pobranej z rzek mieścił się w zakresie $0,60-1,77$ (dla większości próbek był większy od jedności). W próbkach wody pobranej z jezior stosunek średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr do ^{137}Cs mieścił się w zakresie $0,49-1,20$.

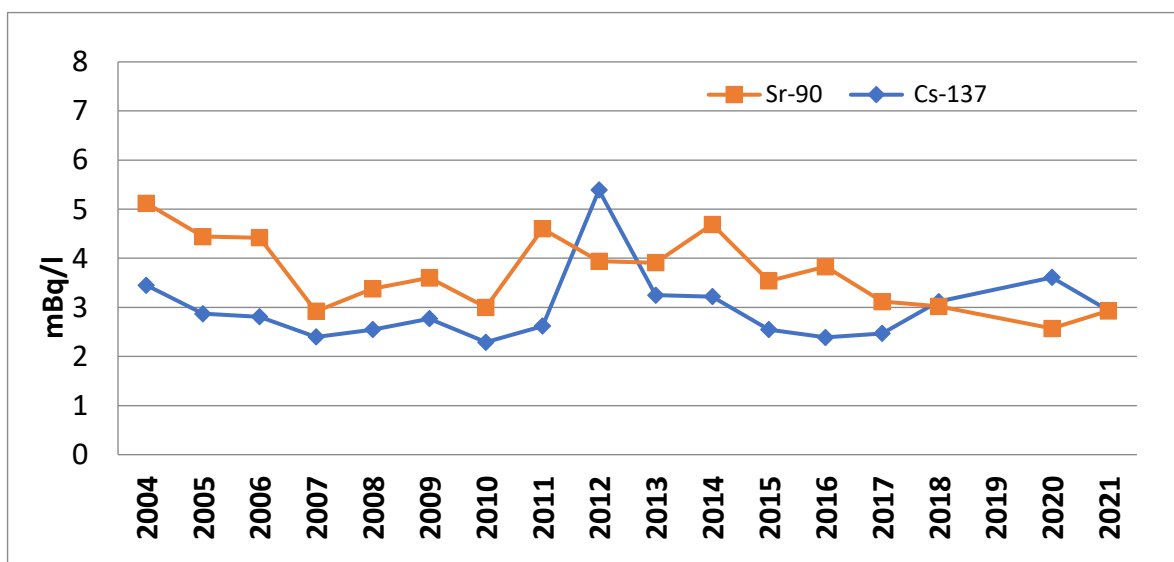
Tabela 9. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior oraz stosunek średnich rocznych stężeń w 2021 r.

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)}	$2,81 \pm 1,03^{\text{b)}$ (14)	$2,81 \pm 0,50^{\text{b)}$ (14)	1,00
Dorzecze Odry (5)	$3,10 \pm 0,90$ (10)	$3,67 \pm 1,19$ (10)	1,09
Jeziora (6)	$2,96 \pm 2,38$ (12)	$2,51 \pm 1,96$ (12)	0,85
Średnia ogólna (18)	$2,94 \pm 1,55$ (36)	$2,95 \pm 1,37$ (36)	1,00

^{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 – 2021. 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, 2020 i 2021, w którym to ilość ^{137}Cs i ^{90}Sr w wodach wynosiła odpowiednio: 2,94 mBq l⁻¹ i 2,95 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 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 – 2021

4. ANALIZA WYNIKÓW OZNACZEŃ STĘŻEŃ ^{137}Cs , ^{238}Pu I $^{239,240}\text{Pu}$ W ODSADACH DENNYCH POBRANYCH W PUNKTACH BADAWCZYCH W 2021 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 2021 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	1,07 ± 0,10 ^{a)}	5,31 ± 0,52 ^{a)}	3,19 ± 3,00 ^{b)}
2.	Wisła Annapol	0,92 ± 0,09	1,86 ± 0,24	1,39 ± 0,66
3.	Wisła Warszawa	6,01 ± 0,56	1,74 ± 0,20	3,88 ± 3,02
4.	Wisła Płock	0,32 ± 0,09	0,34 ± 0,06	0,33 ± 0,01
5.	Wisła Kieźmark	1,07 ± 0,09	1,57 ± 0,20	1,32 ± 0,35
6.	Narew Pułtusk	5,12 ± 0,30	5,29 ± 0,48	5,21 ± 0,12
7.	Bug Wyszków	0,50 ± 0,07	0,73 ± 0,10	0,62 ± 0,16
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	8,05 ± 0,84	5,06 ± 0,52	6,56 ± 2,11
9.	Odra Wrocław	0,58 ± 0,06	0,90 ± 0,10	0,74 ± 0,23
10.	Odra Głogów	2,32 ± 0,18	2,06 ± 0,20	2,19 ± 0,18
11.	Odra Krajnik	0,47 ± 0,11	0,41 ± 0,08	0,44 ± 0,04
12.	Warta Poznań	0,63 ± 0,08	0,76 ± 0,10	0,70 ± 0,09

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

^{b)}Wartość średnia ± 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.

Najniższe stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs było po raz kolejny oznaczone zarówno wiosną jak i jesienią w osadzie pobranym z Wisły w Płocku i wynosiło odpowiednio 0,32 i

0,34 Bq kg⁻¹. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze tego izotopu zawierały się w granicach od 0,33 Bq kg⁻¹ do 6,56 Bq kg⁻¹ i odnosiły się odpowiednio do osadów pobranych na Wiśle w Płocku i na Odrze w Chałupkach. Dotychczas zawartości ¹³⁷Cs otrzymywane dla większości punktów wiosną były wyższe niż jesienią. Tendencja ta nie jest obserwowana w tym roku.

Najwyższe stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs było oznaczone wiosną w osadzie pobranym z Odry w Chałupkach (8,05 Bq kg⁻¹). Pomimo, że jest kilkakrotnie 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).

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 Odry w Krajniku (3,12 mBq kg⁻¹). Najwyższe zaś w osadzie z Wisły pobranym wiosną w Warszawie (65,24 mBq kg⁻¹). Wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{239,240}Pu w osadach dennych zawierają się w granicach od 4,12 mBq kg⁻¹ w osadzie z Odry (Krajnik) do 51,02 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 3 z pośród 24 pobranych próbek osadów, a były to osady pobrane jesienią:

- z Wisły w Krakowie i wynosił $3,86 \pm 1,23$ mBq kg⁻¹,
- z Wisły w Warszawie i wynosił $2,45 \pm 1,33$ mBq kg⁻¹,
- z Odry w Chałupkach i wynosił $2,03 \pm 0,81$ mBq kg⁻¹

Tabela 11. Stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dorzecza Wisły i Odry w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2021 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}
DORZECZE WISŁY				
1.	Wisła Kraków Tynec	$12,16 \pm 1,81^{\text{a}}$	$34,77 \pm 3,68^{\text{a}}$	$23,47 \pm 15,99^{\text{b}}$
2.	Wisła Annapol	$15,81 \pm 2,17$	$38,03 \pm 2,20$	$26,92 \pm 15,71$
3.	Wisła Warszawa	$65,24 \pm 4,79$	$28,58 \pm 4,16$	$46,91 \pm 25,92$
4.	Wisła Płock	$4,48 \pm 2,50$	$3,98 \pm 1,48$	$4,23 \pm 0,35$
5.	Wisła Kiezmark	$9,71 \pm 2,18$	$8,95 \pm 1,96$	$9,33 \pm 0,54$
6.	Narew Pułtusk	$10,81 \pm 2,31$	$11,54 \pm 2,28$	$11,18 \pm 0,52$
7.	Bug Wyszków	< 2	$7,01 \pm 2,31$	$4,25 \pm 3,64$
DORZECZE ODRY				
8.	Odra Chałupki	$59,36 \pm 4,04$	$42,68 \pm 3,55$	$51,02 \pm 11,79$
9.	Odra Wrocław	$10,56 \pm 2,32$	$11,80 \pm 2,37$	$11,18 \pm 0,88$
10.	Odra Głogów	$16,81 \pm 2,13$	$17,72 \pm 2,84$	$17,27 \pm 0,64$
11.	Odra Krajnik	$5,11 \pm 1,37$	$3,12 \pm 0,73$	$4,12 \pm 1,41$
12.	Warta Poznań	$7,14 \pm 1,90$	$9,72 \pm 2,18$	$8,43 \pm 1,82$

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

^{b)}Wartość średnia \pm OS

4.3. 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 $1,28 \text{ Bq kg}^{-1}$ w osadzie pobranym wiosną z jeziora Drawsko do $6,47 \text{ Bq kg}^{-1}$ w osadzie pobranym jesienią z jeziora Rogóźno. Najniższe średnie roczne stężenie ^{137}Cs ($1,44 \text{ Bq kg}^{-1}$) było oznaczone w osadach z jeziora Drawsko, a najwyższe ($6,06 \text{ Bq kg}^{-1}$) 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 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 2021 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	$1,86 \pm 0,14^{\text{a}}$	$2,16 \pm 0,20^{\text{a}}$	$2,01 \pm 0,21^{\text{b}}$
2.	Wadąg Myki	$1,71 \pm 0,17$	$2,31 \pm 0,20$	$2,01 \pm 0,42$
3.	Wielkie Partęczyny Partęczyny	$1,64 \pm 0,10$	$1,41 \pm 0,14$	$1,53 \pm 0,16$
4.	Drawsko Stare Drawsko	$1,28 \pm 0,14$	$1,59 \pm 0,18$	$1,44 \pm 0,22$
5.	Niesłysz Niesulice	$3,63 \pm 0,17$	$4,48 \pm 0,44$	$4,06 \pm 0,60$
6.	Rogóźno Rogóźno	$5,56 \pm 0,25$	$6,47 \pm 0,62$	$6,02 \pm 0,64$

^{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 $^{239,240}\text{Pu}$ ($4,47 \text{ mBq kg}^{-1}$) było oznaczone wiosną w osadzie pobranym z jeziora Wigry, a największe $17,12 \text{ mBq kg}^{-1}$ w osadzie jesiennym z jeziora Niesłysz.

Tabela 13. Stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach w jeziorach w okresie wiosennym i jesiennym oraz średnie roczne stężenie tego radionuklidu w 2021 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	4,47 ± 2,17 ^{a)}	6,64 ± 2,31 ^{b)}	5,56 ± 1,53 ^{b)}
2.	Wadąg Myki	6,07 ± 1,74	8,86 ± 2,93	7,47 ± 1,97
3.	Wielkie Parteczyzny Partęczyny	6,57 ± 1,47	6,62 ± 2,17	6,60 ± 0,04
4.	Drawsko Stare Drawsko	12,61 ± 2,49	8,23 ± 2,36	10,42 ± 3,10
5.	Niesłysz Niesulice	15,38 ± 2,88	17,12 ± 2,97	16,25 ± 1,23
6.	Rogóźno Rogóźno	9,02 ± 2,41	7,72 ± 1,81	8,37 ± 0,92

^{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 5,56 mBq kg⁻¹ w jeziorze Wigry do 16,25 mBq kg⁻¹ w jeziorze Niesłysz.

Stężenie ^{238}Pu w osadach dennych było we wszystkich 12 próbkach mniejsze od granicy detekcji (2 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 było na bardzo wyrównanym poziomie i wynosiło odpowiednio 2,28; 2,12 i 2,84 Bq kg⁻¹. Największe różnice w stężeniach ^{137}Cs obserwowano dla dorzecza Odry od 0,58 do 8,05 Bq kg⁻¹.

Średnie stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w 2021 roku było najniższe jesienią w dorzeczu Odry i wynosiło 1,84 Bq kg⁻¹, Najwyższą wartość oznaczono jesienią w jeziorach – 3,07 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 2021 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)}	2,14 ± 2,37 ^{b)}	2,41 ± 2,05	2,28 ± 12,13 (14)	0,32–6,01
Dorzecze Odry (5)	2,41 ± 3,24	1,84 ± 1,90	2,12 ± 2,29 (10)	0,58–8,05
Jeziora (6)	2,61 ± 1,66	3,07 ± 1,99	2,84 ± 1,77 (12)	1,28–6,47
Średnia ogólna (18)	2,37 ± 2,30	2,47 ± 1,94	2,42 ± 1,95 (36)	0,32–8,05

^{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 2021 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)}	17,17 ± 21,70 ^{b)}	18,98 ± 14,31	18,08 ± 17,68	3,98–65,24
Dorzecze Odry (5)	19,80 ± 22,56	17,01 ± 15,28	18,40 ± 18,22	3,12–59,36
Jeziora (6)	9,02 ± 4,21	9,02 ± 3,98	9,11 ± 3,91	4,47–17,12
Średnia ogólna (18)	15,18 ± 17,68	15,17 ± 12,30	15,18 ± 13,86	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 18,08 mBq kg⁻¹, 18,40 mBq kg⁻¹ i 9,11 mBq kg⁻¹. Największe różnice

stężeń oznaczanych izotopów występowały w dorzeczu Wisły i mieściły się w zakresie od 3,98 do 65,24 mBq kg⁻¹.

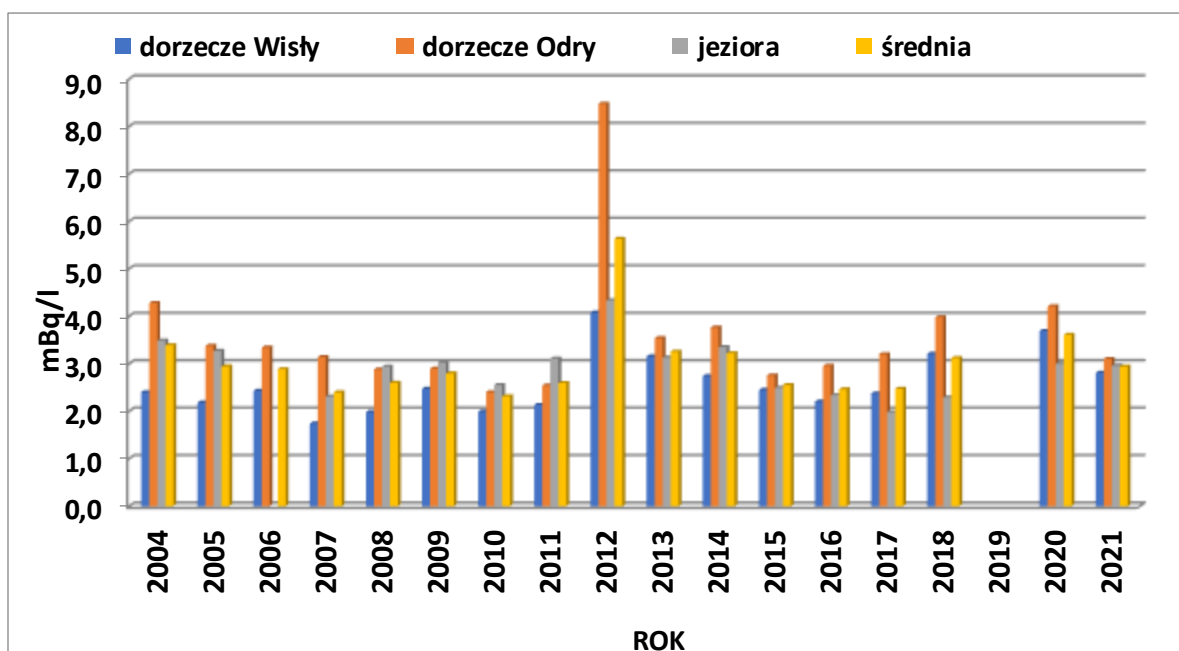
Stężenie promieniotwórcze ²³⁸Pu w osadach dennych było w większości przypadków mniejsze od granicy detekcji (2 mBq kg⁻¹). Zostało oznaczone tylko w 3 z pośród 24 próbek osadów, a były to osady pobrane jesienią w Krakowie (3,86 mBq kg⁻¹), Warszawie (2,45 mBq kg⁻¹) i w Chałupkach (2,03 mBq kg⁻¹).

Dla jezior stężenie ²³⁸Pu nie zostało oznaczone w żadnym z 12 pobranych osadów.

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 2004-2021

Rysunek 3. przedstawia wykres obrazujący średnie roczne stężenia promieniotwórcze ¹³⁷Cs w wodzie dla dorzeczy Wisły, Odry i jezior w odniesieniu do ogólnej średniej rocznej w

latach 2004-2021. W roku 2019 badania prowadzone były tylko dla jednego (jesiennego) poboru stąd brak wartości średnich rocznych.

Najniższe wartości średniego rocznego stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs 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. 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 2020 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.

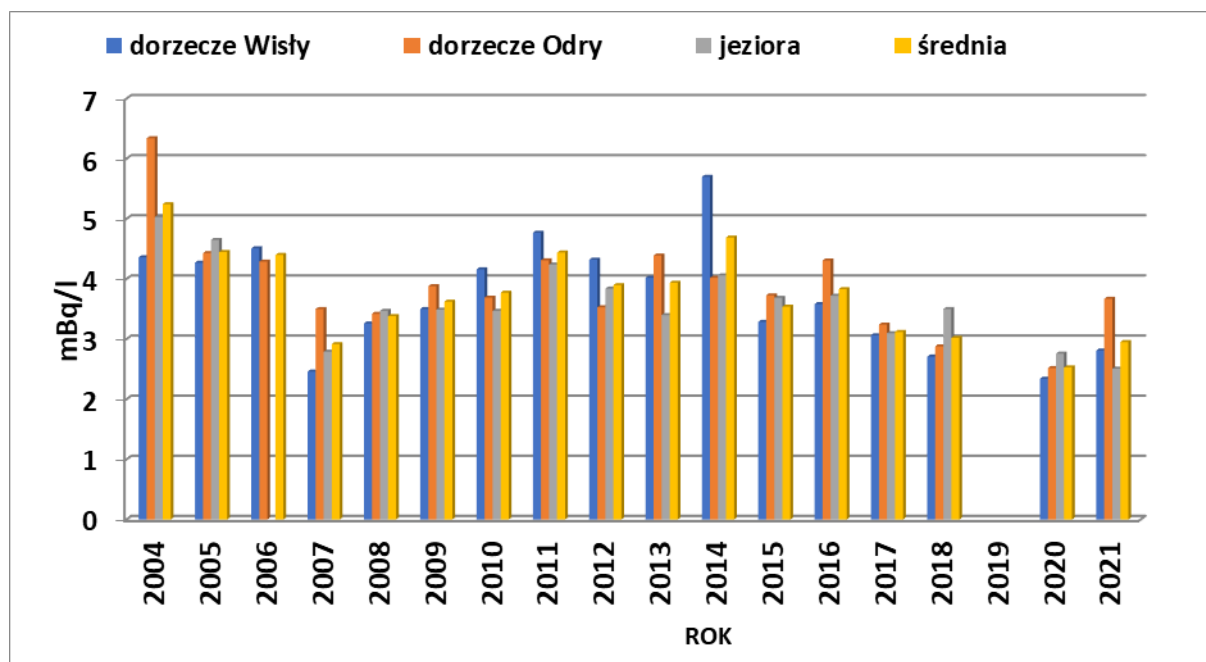
W bieżącym roku obserwujemy bardzo wyrównane ilości izotopu cezu zarówno w wodach dorzeczy jak i wodach jeziornych.

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 w latach 2004-2021. 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 .



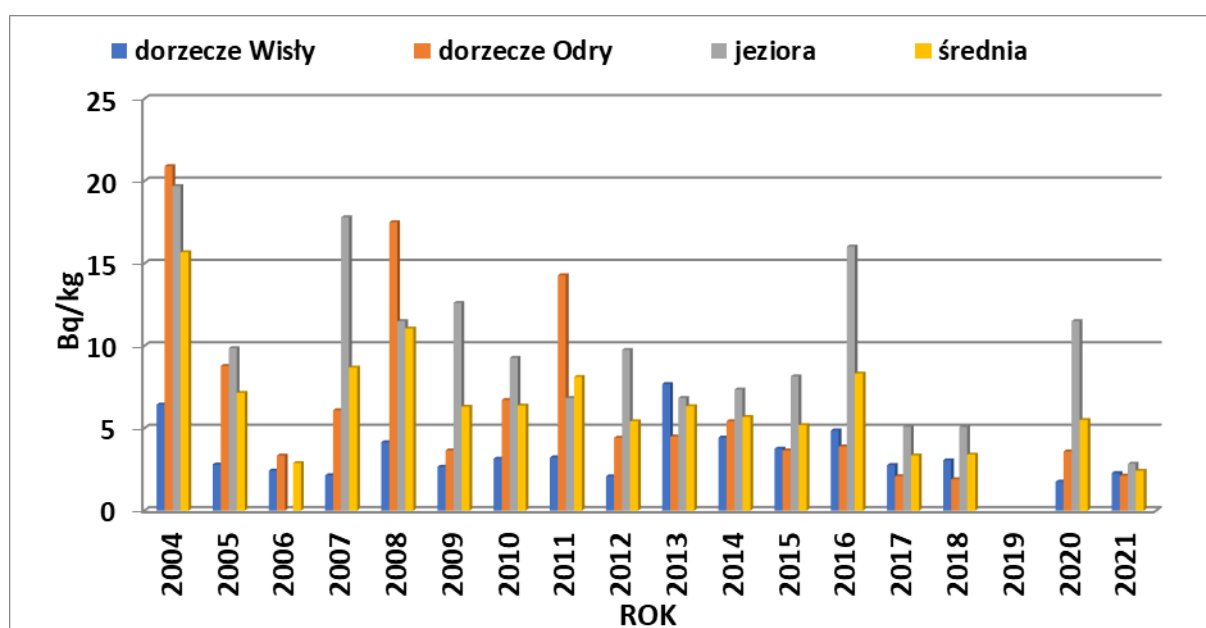
Rys. 4. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2021

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 zarówno dla dorzeczy jak i jezior. W bieżącym roku odnotowano niewielki wzrost

zawartości izotopu strontu w dorzeczu Odry, co miało nieznaczny wpływ na wartość średniej, utrzymującej się na zbliżonym poziomie od kilku lat.

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 2004-2021.



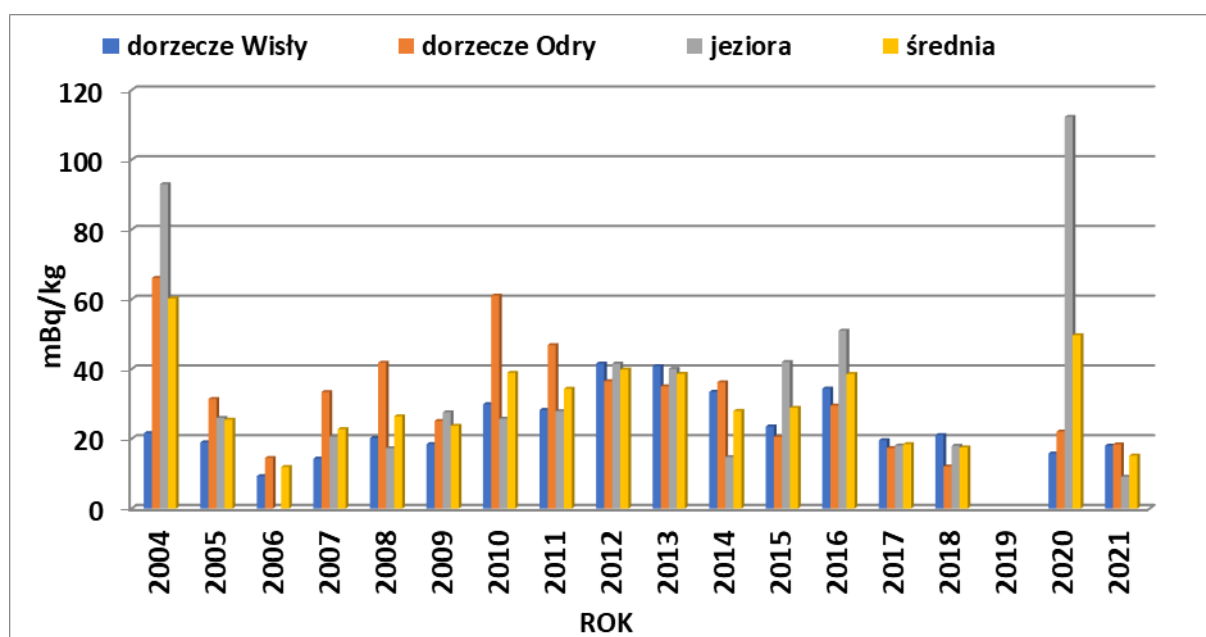
Rys. 5. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dorzecza Wisły, Odry i jezior w latach 2004-2021

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 promieniotwórczego ^{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 2021. Natomiast ogólna średnia roczna zawartości ^{137}Cs w osadach dennych osiągnęła 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 $64,86 \pm 1,10 \text{ Bq kg}^{-1}$). 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.

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 2004-2021.

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 2004-2021.

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^{-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 (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 wartości ogólnej średniej rocznej izotopów $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych, a wynosiły one odpowiednio: $18,47 \text{ mBq kg}^{-1}$ i $18,61 \text{ mBq kg}^{-1}$ (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 Rogóžno. W bieżącym roku taka sytuacja nie miała miejsca. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach miało najniższą wartość na przestrzeni wszystkich lat badawczych.

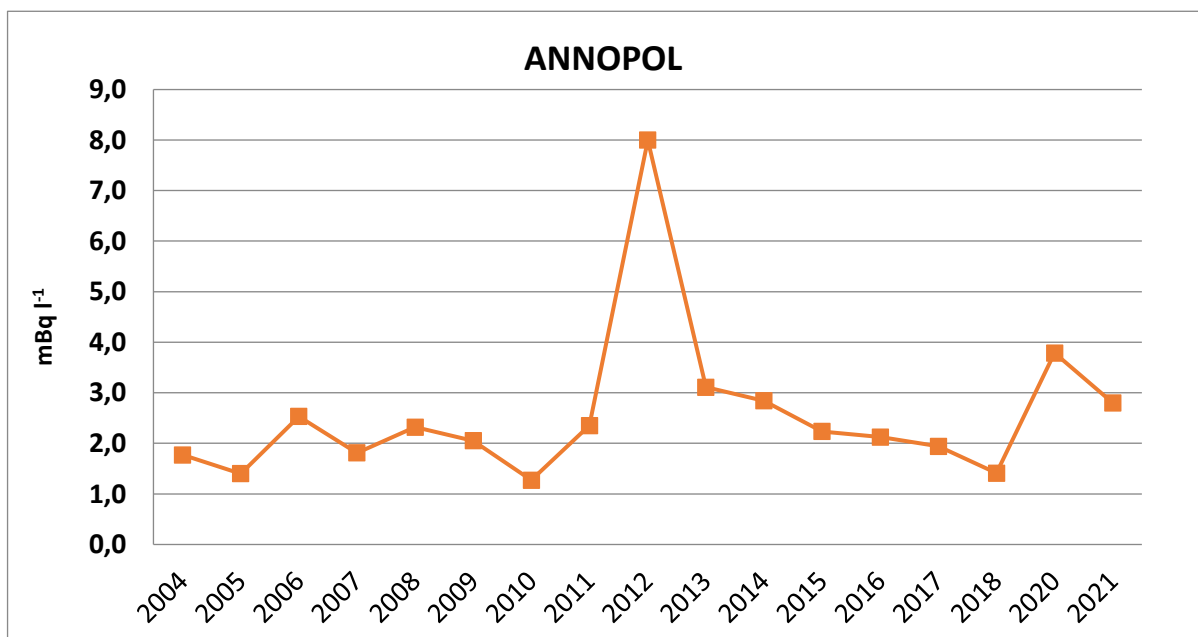
6. ZMIANY WARUNKÓW RADIOLOGICZNYCH NA PRZESTRZENI LAT W WYBRANYCH PUNKTACH BADAWCZYCH

Zmiany warunków radiologicznych na przestrzeni lat przedstawiono dla pięciu wybranych punktów pomiarowych zlokalizowanych: na Wiśle (Annopol, Kraków, Warszawa, Płock,) i na Warcie (Poznań) oraz na dwóch jeziorach Niesłysz i Rogóźno. 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 Wisły w Annopolu

Rysunek 7. Przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Annopolu 2004-2021. 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 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.



Rys. 7. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Annopolu w latach 2004-2021

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

Rysunek 8. Przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Krakowie w latach 2004-2021. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

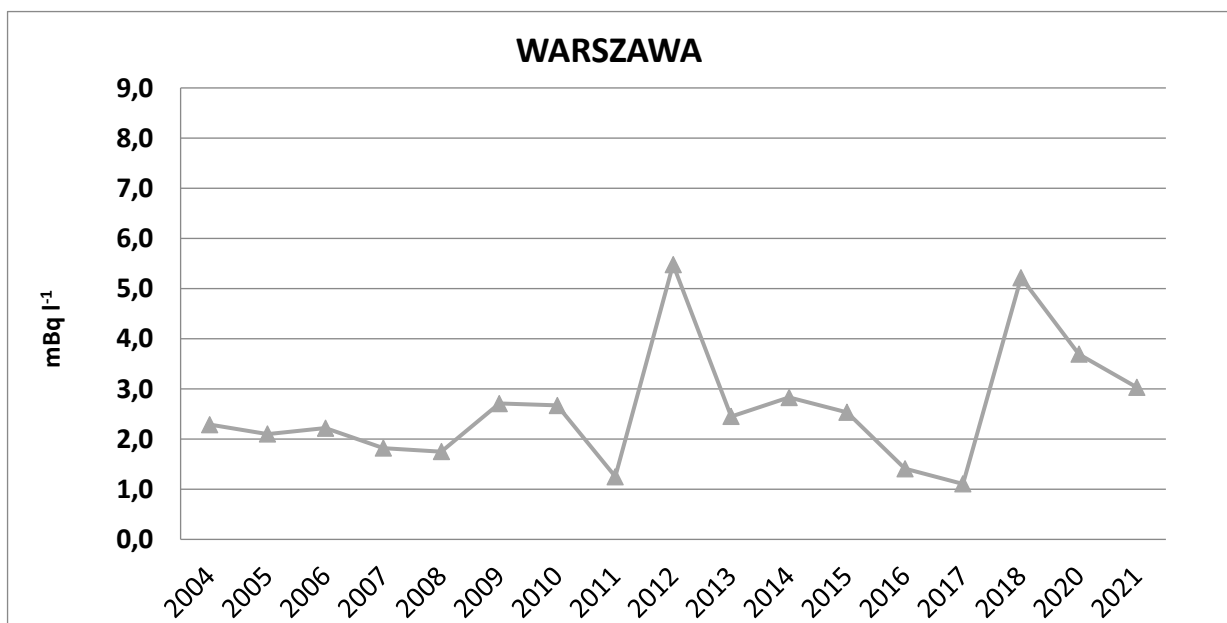
W początkowych latach najwyższy średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs zanotowano w pierwszym roku obserwacji. W kolejnych latach średnia zawartość ^{137}Cs w wodach ulegała zmianom. W latach 2009 – 2014 oraz 2016 – 2021 obserwowaliśmy nieznaczny wzrost stężenia promieniotwórczego badanego izotopu, przy czym najwyższe stężenie odnotowano roku 2012 – 5,2 mBq l⁻¹. 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.



Rys. 8. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Krakowie w latach 2004-2021

6.1.3. 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 2004-2021 przedstawia Rysunek 9. W pierwszych latach obserwacji zanotowano niski i bardzo wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs .

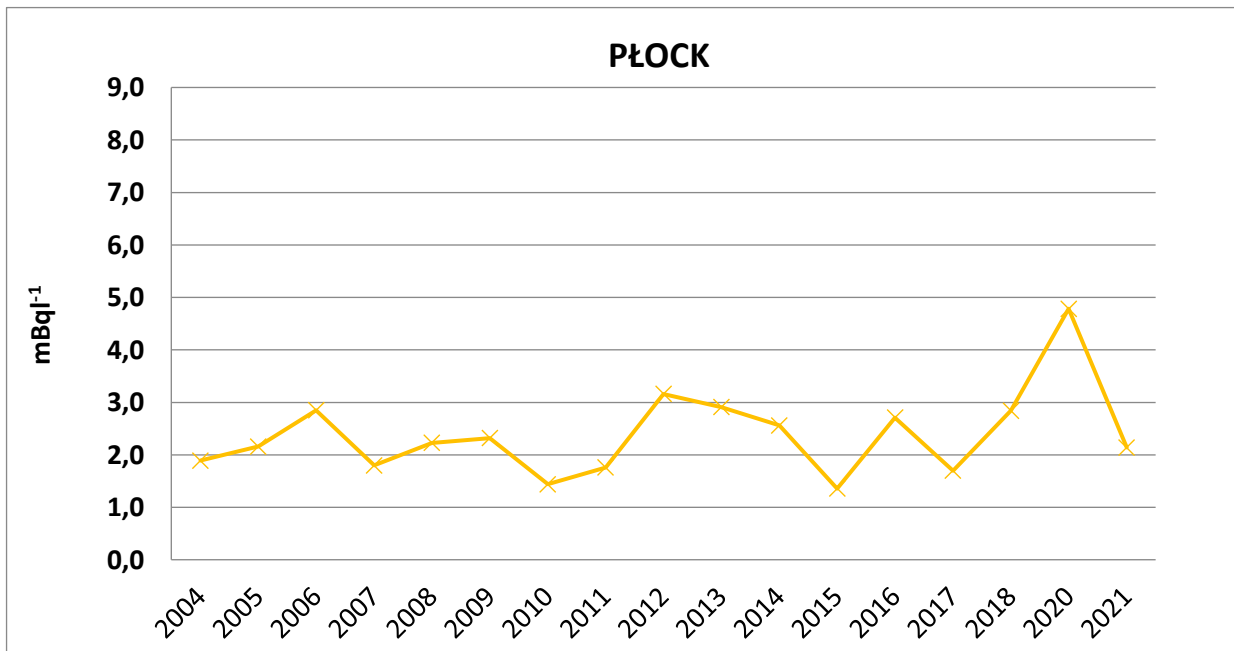


Rys. 9. Zawartość ¹³⁷Cs w wodach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2021

Od roku 2011 obserwujemy większe fluktuacje. Najwyższą wartość izotopu cezu zanotowano w 2012 roku. Podwyższona wartość średniej rocznej ¹³⁷Cs w wodzie spowodowana została oznaczonym stężeniem promieniotwórczym tego izotopu w próbce wiosennej (9,71 mBq l⁻¹), które można tłumaczyć czasowym wpływem wód innego pochodzenia w to miejsce. Trwałości tej zmiany nie potwierdziły badania jesienne, w których oznaczone stężenie promieniotwórcze ¹³⁷Cs w wodzie wynosiło 1,25 mBq l⁻¹, jak również badania wykonane w kolejnych latach. Analogiczną sytuację zaobserwowano w 2018 roku.

6.1.4. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w wodzie pobranej z Wisły w Płocku

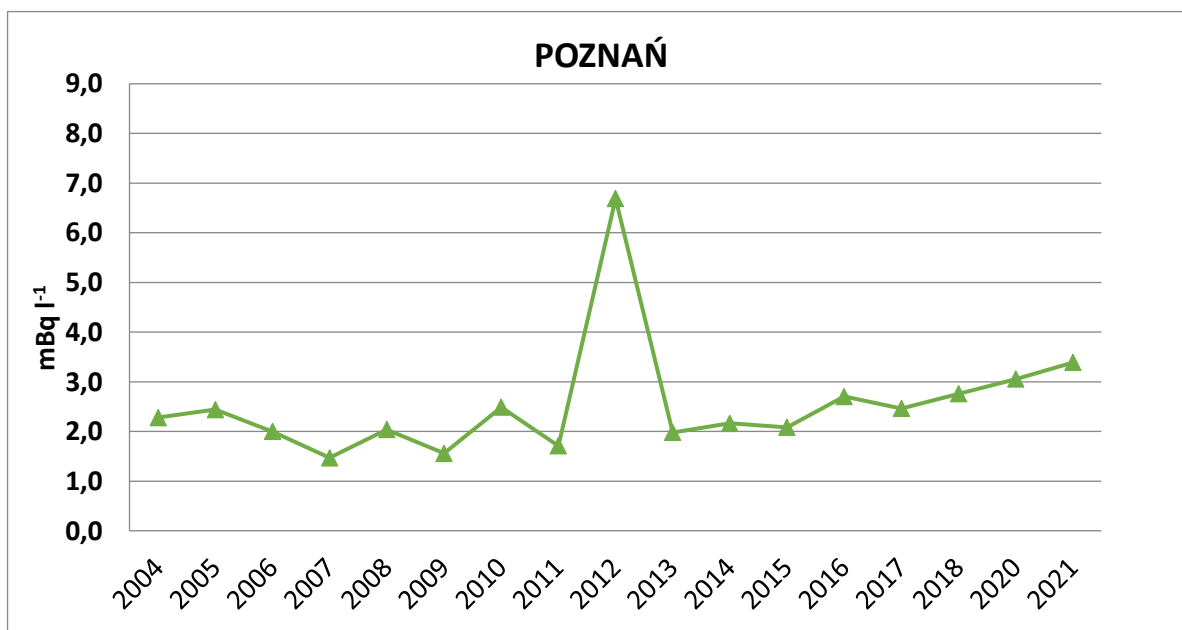
W przypadku punktu poboru w Płocku występują nieznaczne zmiany zawartości izotopu ¹³⁷Cs w wodzie w poszczególnych latach obserwacji (Rysunek 10.). Zmiany te mieszczą się w granicach od 1,4 do 3,2 mBq l⁻¹ z wyjątkiem 2020 roku, w którym średnia roczna zawartość izotopu cezu wyniosła 4,8 mBq l⁻¹. Trwałość tej zmiany nie została potwierdzona w bieżącym roku.



Rys. 10. Zawartość ^{137}Cs w wodach Wisły pobranej w Płocku w latach 2004-2021

6.1.5. Analiza zawartości ^{137}Cs w wodzie pobranej z Warty w Poznaniu

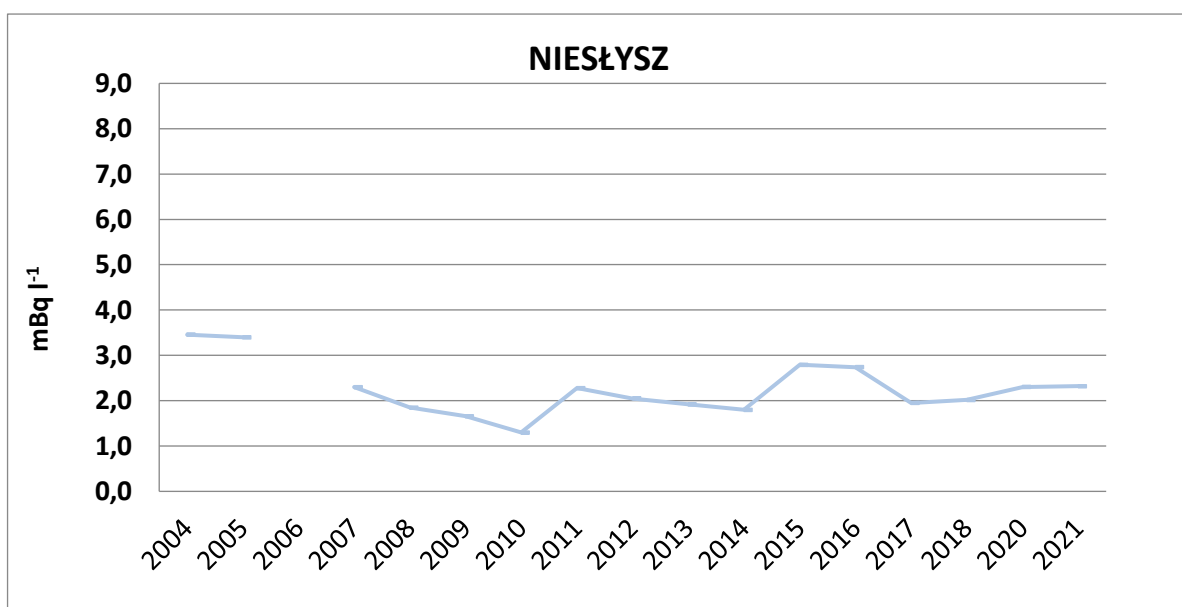
Średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs w wodzie pobieranej w Poznaniu w latach 2004-2021 był wyrównany (Rysunek 11.), a zmiany mieściły się w zakresie ok 2 mBq l⁻¹. Jedynie w roku 2012 zanotowano wzrost zawartości ^{137}Cs . Średnią roczną stężenia tego izotopu zawyżył wynik próbki wiosennej (10,96 mBq l⁻¹). Mogło to być spowodowane czasowym wpływem wód innego pochodzenia w to miejsce. Trwałości tej zmiany nie potwierdziły zarówno badania jesienne, w których oznaczone stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w wodzie wynosiło 2,41 mBq l⁻¹ jak i badania w kolejnych latach. Od roku 2017 obserwujemy nieznaczny wzrost zawartości izotopu cezu w wodach Warty. Pozostaje ona nadal na niskim poziomie.



Rys. 11. Zawartość ^{137}Cs w wodzie z Warty pobranej w Poznaniu w latach 2004-2021

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

Przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w wodach z jeziora Niesłysz w latach 2004–2021 przedstawiono na Rys.12.



Rys. 12. Zawartość ^{137}Cs w wodzie z jeziora Niesłysz w latach 2004-2021

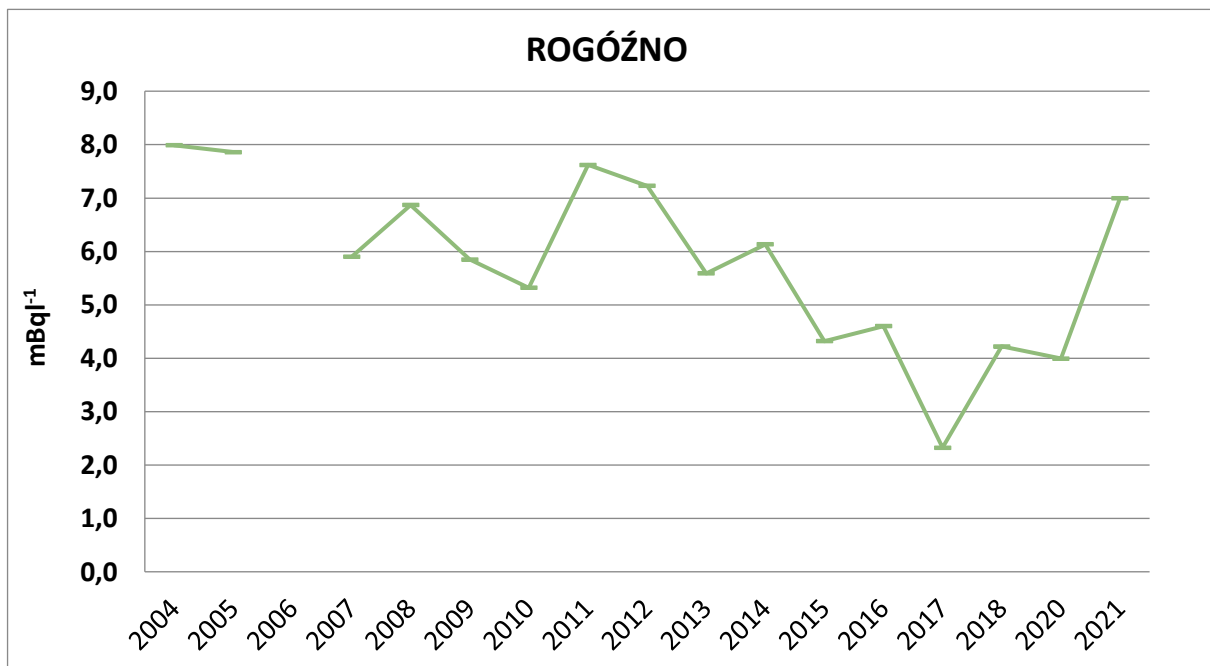
Podane wartości są średnimi rocznymi w poszczególnych latach. W roku 2006 nie były prowadzone badania dla jezior stąd brak wyników na pokazanym wykresie. Najwyższe

wartości izotopu cezu oznaczono w pierwszych latach badań (2004, 2005). Na przestrzeni 17 lat zakres w jakim obserwowano fluktuacje to niespełna 2 mBq l⁻¹. Można zatem stwierdzić, że zawartość ¹³⁷Cs w wodach jeziora Niesłysz jest niezmienna od 14 lat i jest na niskim poziomie.

6.1.7. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w wodzie pobranej z jeziora Rogóźno

Przebieg czasowy średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ¹³⁷Cs w wodach jeziora Rogóźno w latach 2004 – 2021 przedstawiono na Rysunku 13. W roku 2006 nie były prowadzone badania dla jezior stąd brak wyników na pokazanym wykresie.

Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu 14 lat (do 2017 roku) obserwujemy tendencję spadkową zawartości ¹³⁷Cs. W ostatnich trzech latach zawartość izotopu cezu nieznacznie wzrosła. Na ogół w jeziorze Rogóźno obserwowane są większe wartości stężenia promieniotwórczo ¹³⁷Cs (jak i pozostałych badanych izotopów). Wpływ na poziom badanych pierwiastków może mieć ilość i rodzaj cieków wodnych wpływających do jeziora, tym bardziej, że jezioro Rogóźno nie jest jeziorem przepływowym lecz jest pochodzenia krasowego, a ten typ jezior często charakteryzuje się obecnością osadów nieprzepuszczalnych. Mogą być to powody kumulacji badanych nuklidów.



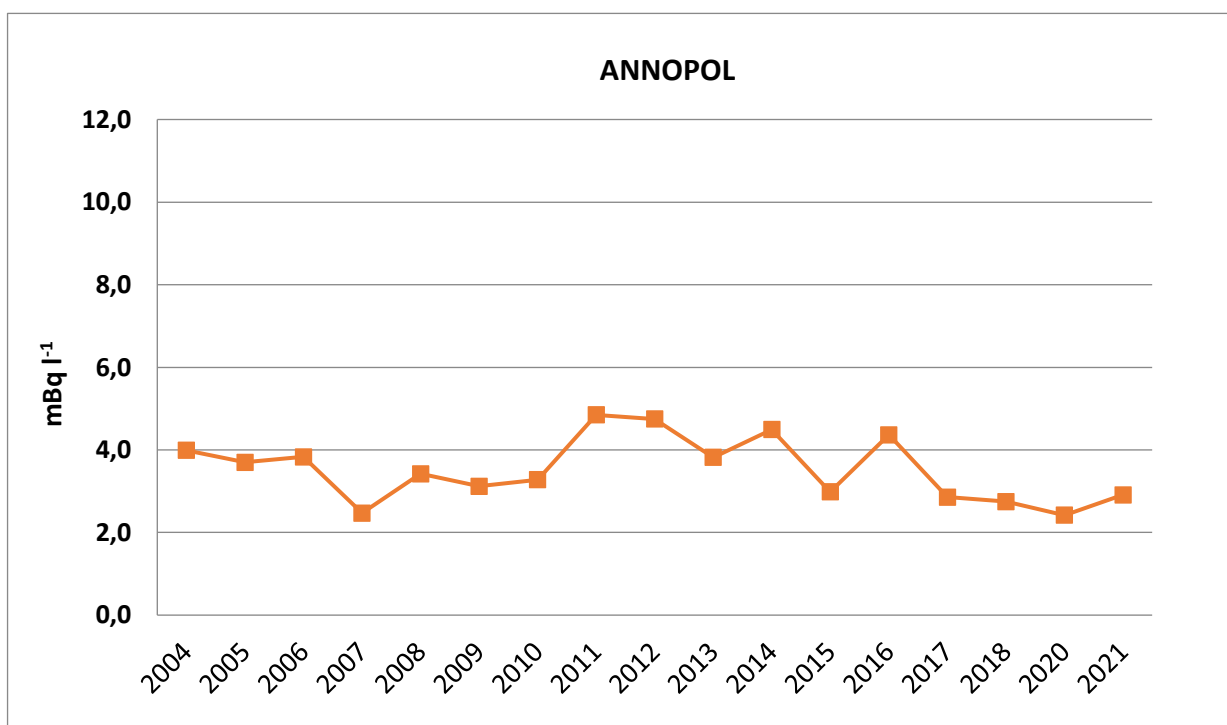
Rys. 13. Zawartość ¹³⁷Cs w wodzie z jeziora Rogóźno w latach 2004-2021

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

6.2.1. 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 2004-2021 przedstawiono na Rysunku 14. Podane wartości są średnimi rocznymi w poszczególnych latach.

Z przedstawionej zależności wynika, że w przeciągu siedemnastu lat zmiany zawartości ^{90}Sr w wodach były nieznaczne. Zakres w jakim obserwowano fluktuacje to ok. 2 mBq l^{-1} . Można zatem stwierdzić, że zawartość ^{90}Sr w wodach z Wisły jest niezmienna od kilkunastu lat i jest na niskim poziomie. Szczególnie stabilną sytuację obserwujemy od 2017 roku.

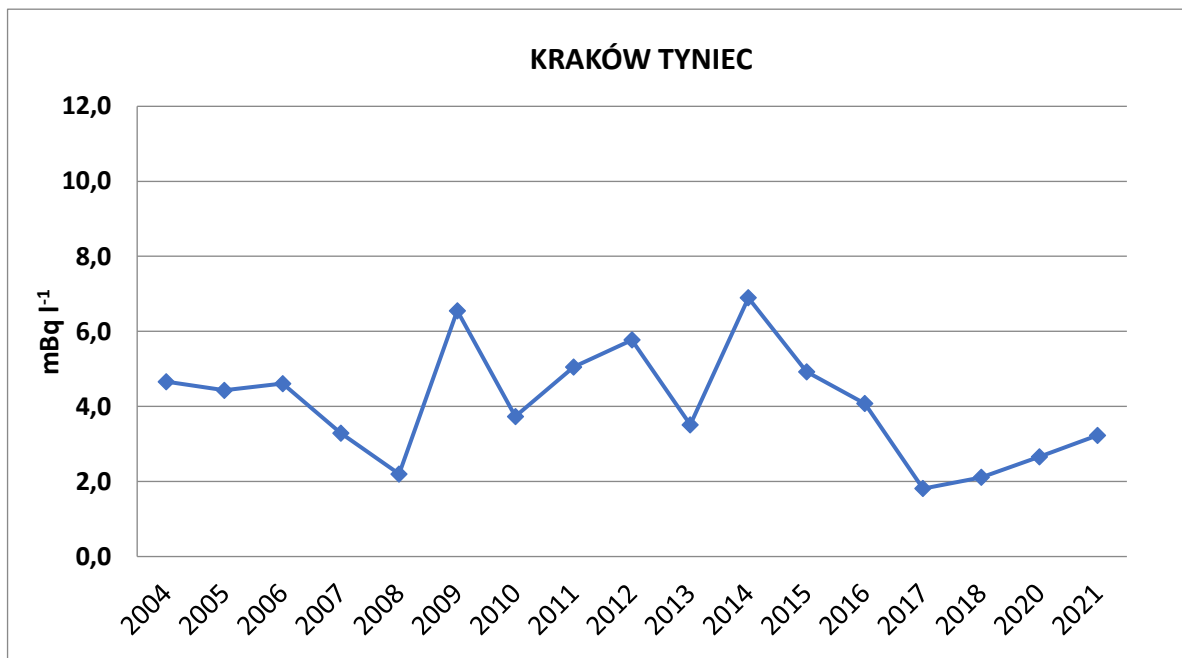


Rys. 14. Zawartość ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Annopolu w latach 2004-2021

6.2.2. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z Wisły w Krakowie

Rysunek 15. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Tyńcu w latach 2004-2021. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu.

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). Można przyjąć, że stężenie ^{90}Sr w latach 2004-2021 przy nieznacznych fluktuacjach pozostaje na zbliżonym poziomie.

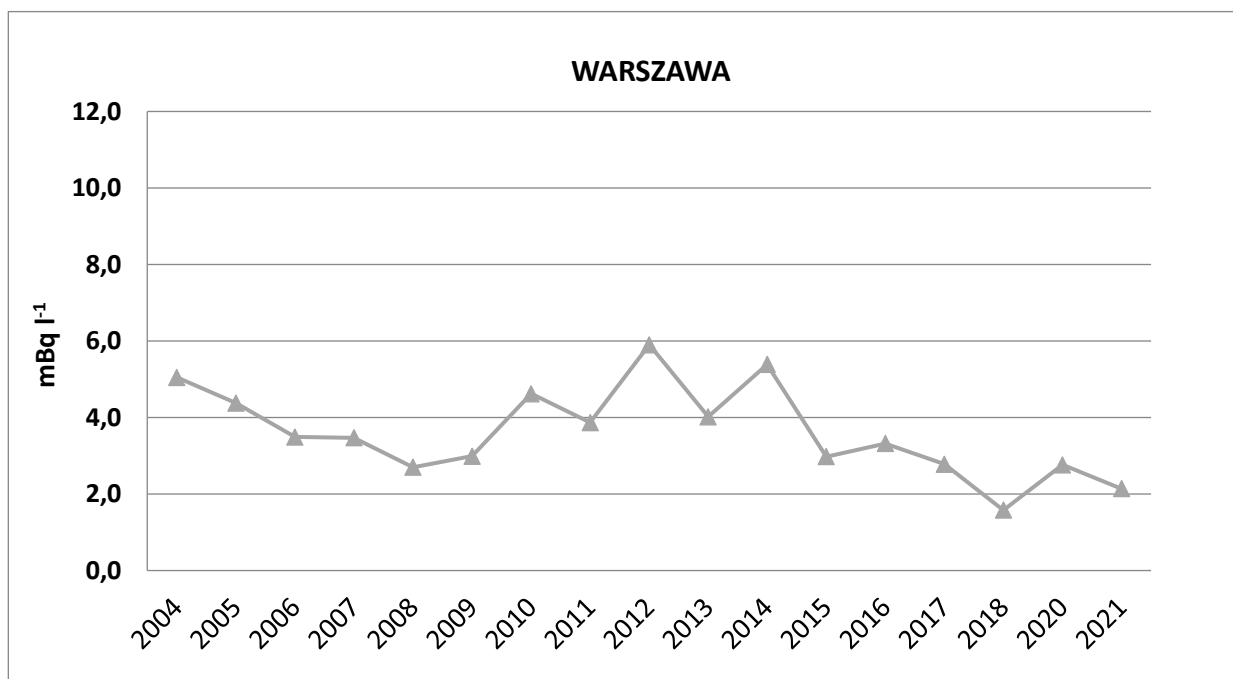


Rys. 15. Zawartość ^{90}Sr w wodach Wisły pobranej w Krakowie w latach 2004-2021

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

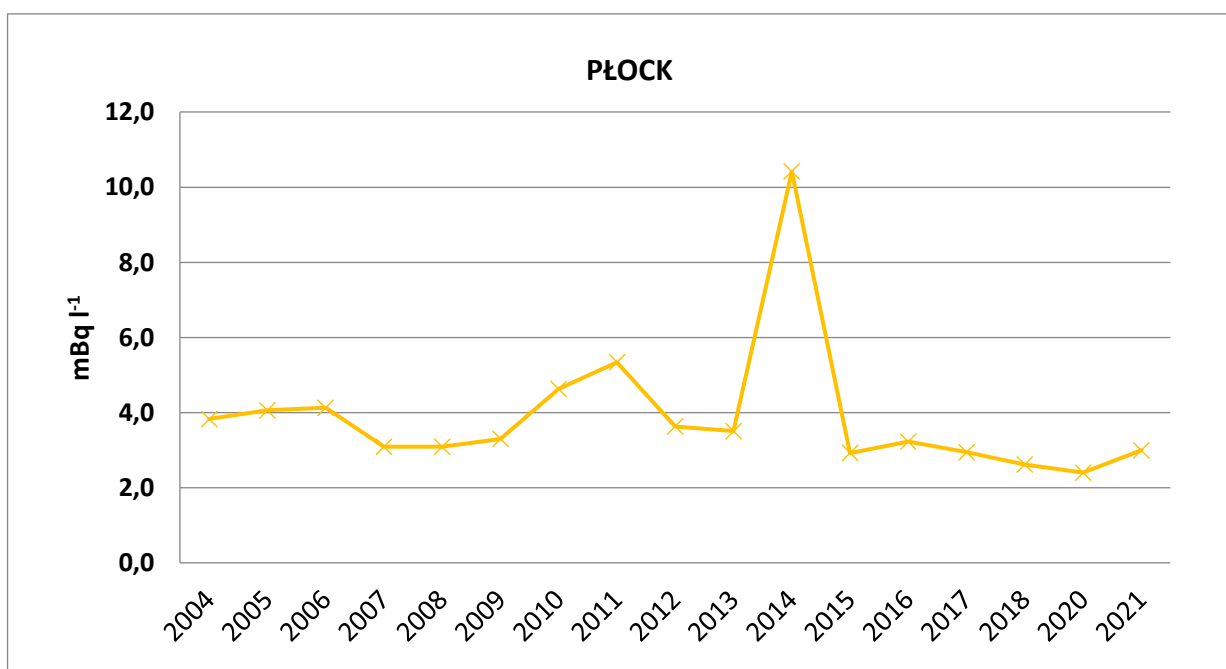
W przypadku wody pobieranej w Warszawie średnia roczna zawartość ^{90}Sr w latach 2004-2021 mieści się w zakresie od 1,6 do 5,9 mBq l^{-1} , a maksymalną wartość stężenia promieniotwórczego cezu odnotowano w roku 2012.

Jednak w stosunku do pozostałych wartości nie jest to wynik znacznie odbiegający.



Rys. 16. Zawartość ⁹⁰Sr w wodach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2021

6.2.4. Analiza zawartości ⁹⁰Sr w wodzie pobranej z Wisły w Płocku

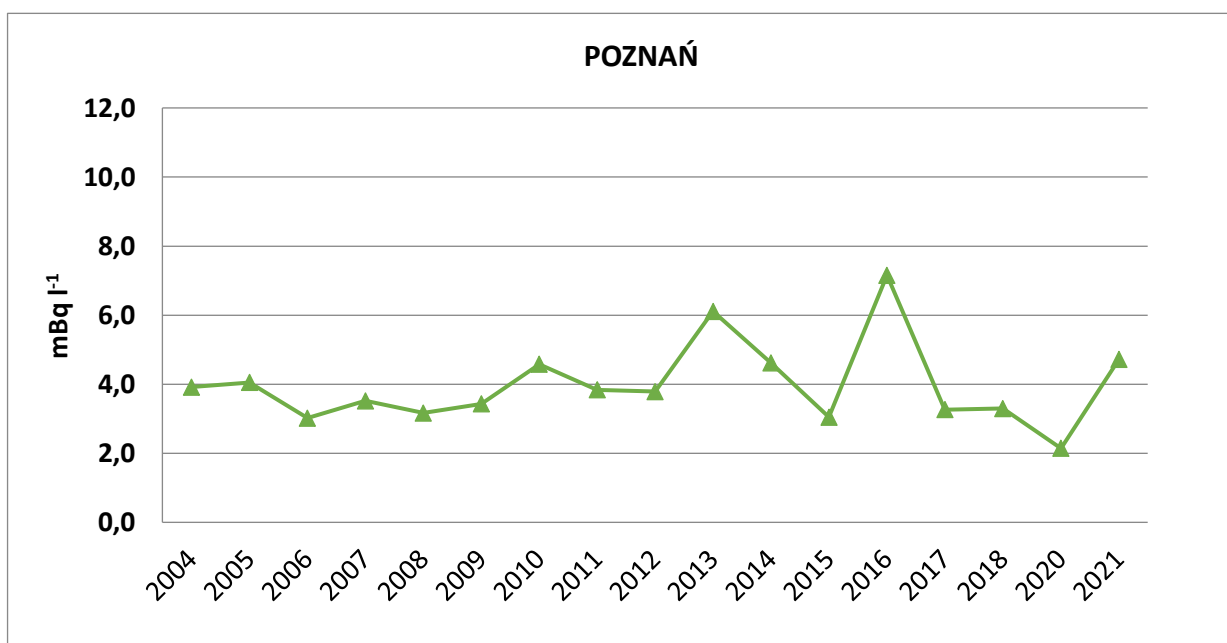


Rys. 17. Zawartość ⁹⁰Sr w wodach Wisły pobranych w Płocku w latach 2004-2021

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ⁹⁰Sr w wodach Wisły pobranej w Płocku w latach 2004-2021 obrazuje Rysunek 17. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Na przestrzeni lat średnie stężenie promieniotwórcze ⁹⁰Sr

mieści się w wąskim zakresie od 2,4 (rok 2020) do 5,3 mBq l⁻¹ (rok 2011). Wyjątek stanowi rok 2014, gdzie zanotowano około dwukrotny wzrost zawartości stężenia promieniotwórczego ⁹⁰Sr. Badania wykonane w kolejnych latach nie potwierdziły jednak trwałość tej zmiany, a zawartość izotopu strontu jest na bardzo stabilnym poziomie.

6.2.5. Analiza zawartości ⁹⁰Sr w wodzie pobranej z Warty w Poznaniu

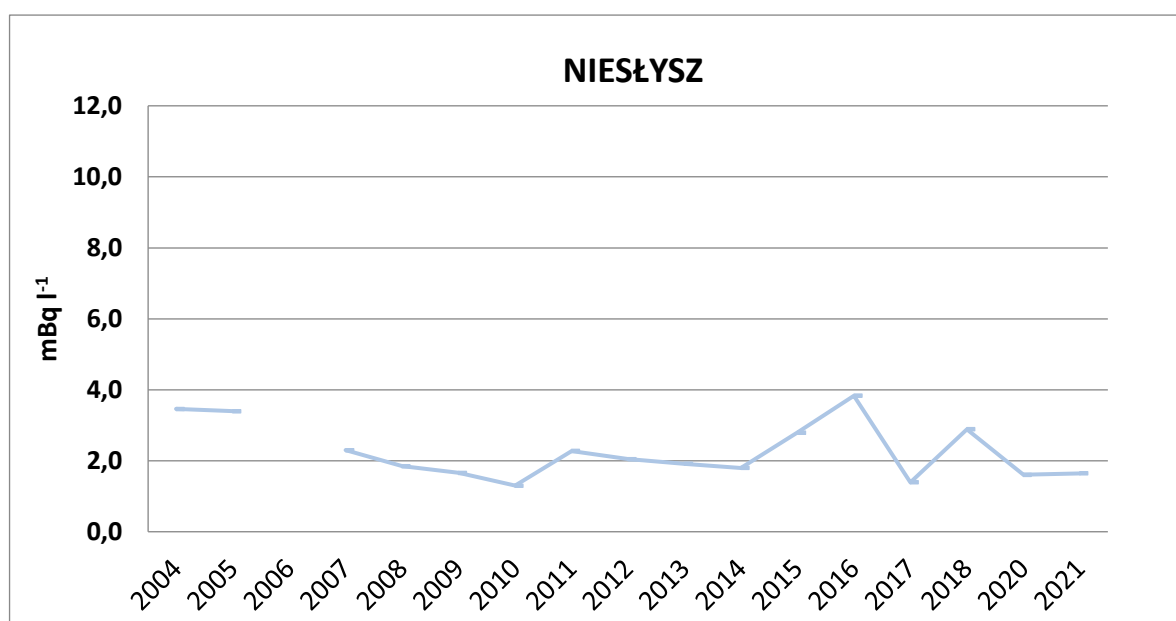


Rys. 18. Zawartość ⁹⁰Sr w wodach Warty pobranych w Poznaniu w latach 2004-2021

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze izotopu ⁹⁰Sr w wodach Warty pobranej w Poznaniu w latach 2004-2021 obrazuje Rysunek 18. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. W tym punkcie poboru nie zanotowano znaczących zmian na przestrzeni pierwszych dziewięciu lat pomiarowych, a średnie roczne zawartości analizowanego nuklidu w wodzie były na bardzo niskim poziomie i mieściły się w zakresie od 3,02 w roku 2006 do 4,58 mBq l⁻¹ w roku 2010. Od 2012 roku widzimy nieco większą zmienność, chociaż stężenie promieniotwórcze ⁹⁰Sr pozostaje nadal na niskim poziomie i mieści się w zakresie ok. 3 mBq l⁻¹. W bieżącym roku wynosi 4,7 mBq l⁻¹.

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

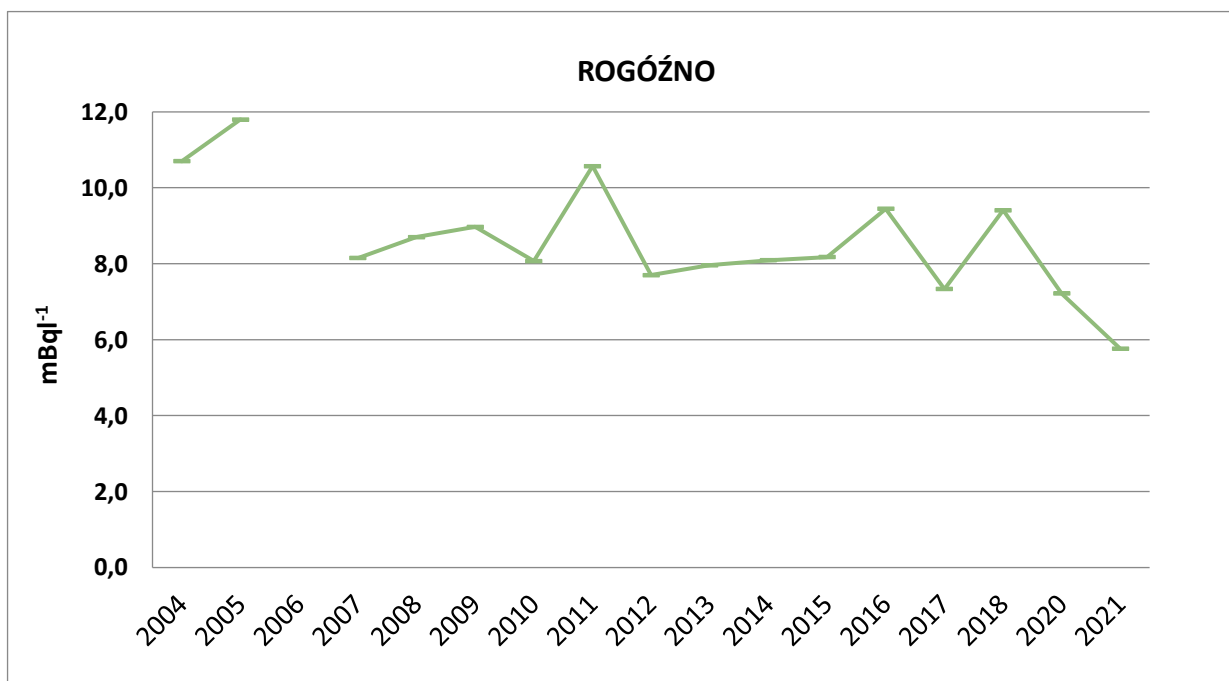
Podobnie jak dla ^{137}Cs średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach jeziora Niesłysz w latach 2004-2021 było wyrównane (Rys. 19.). Nieznaczną rozbieżność stanowi wynik otrzymany w 2016 roku, kiedy wartość stężenia wzrosła ($3,84 \text{ mBq l}^{-1}$), pozostając jednak na bardzo niskim poziomie. W roku 2021 oznaczono średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr na poziomie $1,65 \text{ mBq l}^{-1}$.



Rys. 19. Zawartość ^{90}Sr w wodach jeziora Niesłysz w latach 2004-2021

6.2.7. Analiza zawartości ^{90}Sr w wodzie pobranej z jeziora Rogóźno

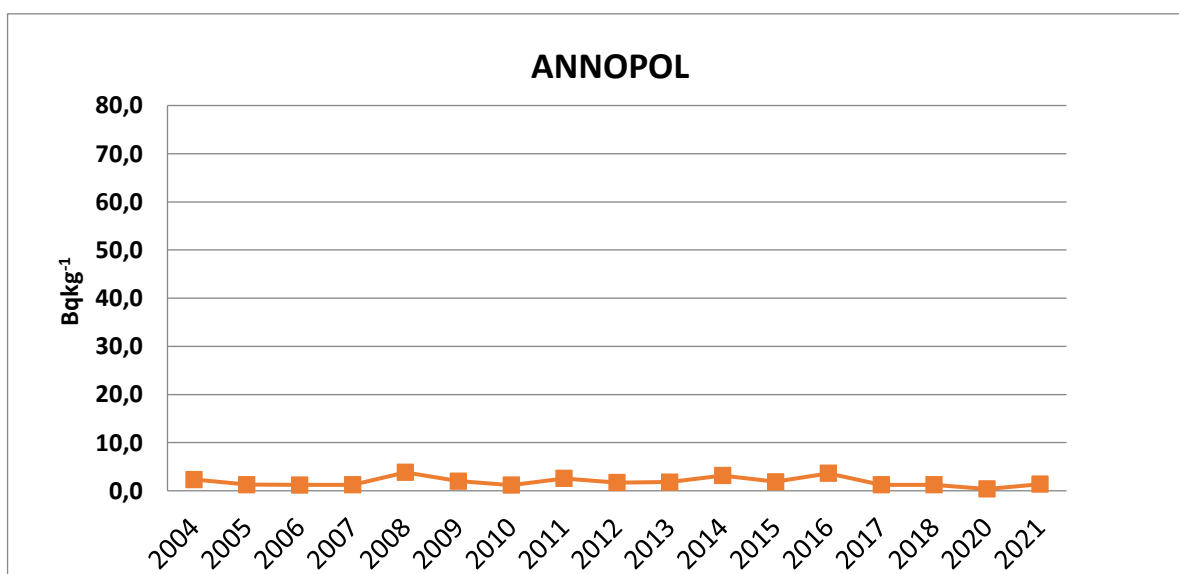
Jak widać na Rys. 20. w kolejnych latach badań dla punktu pomiarowego na jeziorze Rogóźno zawartość ^{90}Sr w wodzie zmieniała się nieznacznie i zawierała się w granicach od $5,76 \text{ mBq l}^{-1}$ (2021 rok) do $11,80 \text{ mBq l}^{-1}$ (2005 rok). Jak widać zmiany zawartości ^{90}Sr na przestrzeni lat mieszczą się w zakresie kilku mBq l^{-1} . Należy jednak zauważyć, że stężenie tego izotopu w jeziorze Rogóźno jest wyższe, niż w pozostałych jeziorach. Analogicznie jak w przypadku izotopu ^{137}Cs . W 2021 roku zanotowano najniższe stężenie promieniotwórcze ^{90}Sr , które wynosiło $5,76 \text{ mBq l}^{-1}$.



Rys. 20. Zawartość ⁹⁰Sr w wodach jeziora Rogóżno w latach 2004-2021

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

6.3.1. Analiza zawartości ¹³⁷Cs w osadzie pobranym z Wisły w Annopolu

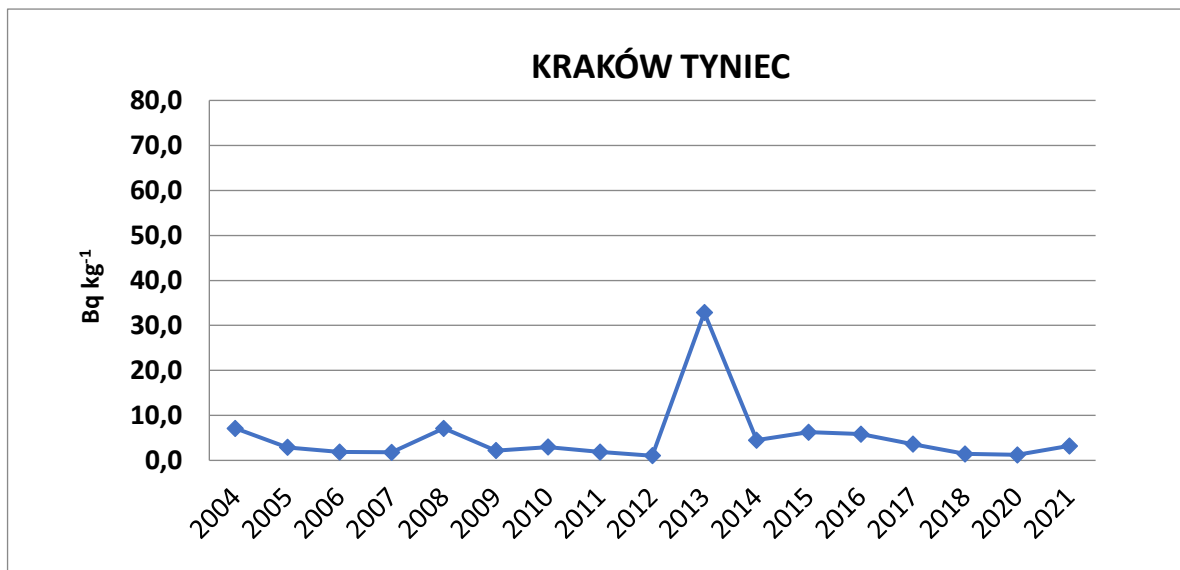


Rys. 21. Zawartość ¹³⁷Cs w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2021

Zawartość ¹³⁷Cs w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2021 przedstawiona została na Rysunku 21.

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 2020 i wynosiła ona $0,34 \text{ Bq kg}^{-1}$, zaś maksymalną w roku 2008 - $3,8 \text{ Bq kg}^{-1}$. W 2021 roku uzyskano wartość $1,39 \text{ Bq kg}^{-1}$.

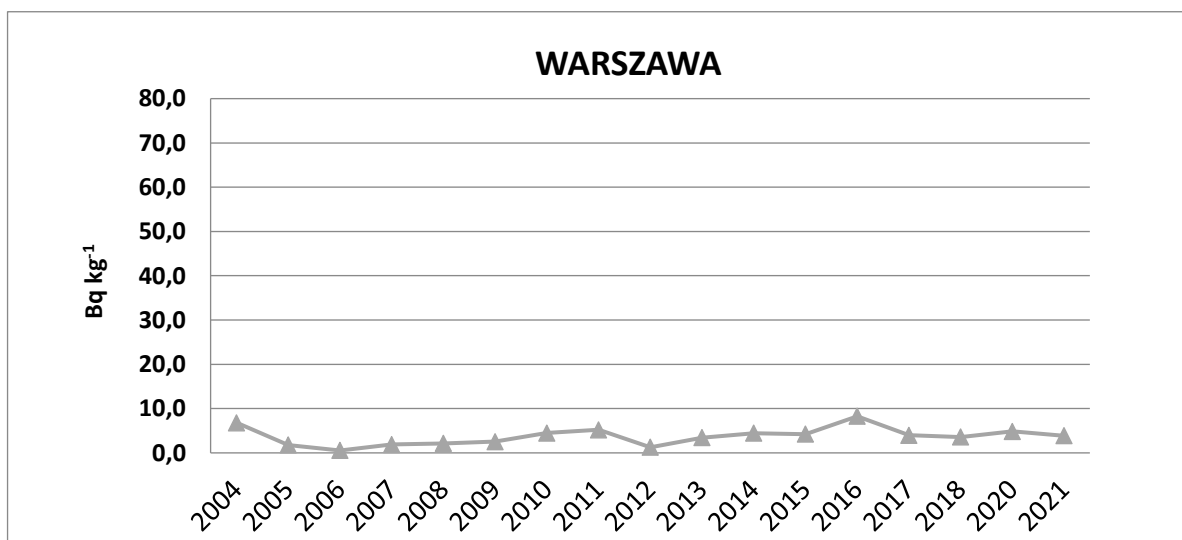
6.3.2. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Wisły w Krakowie



Rys. 22. Zawartość ^{137}Cs w osadach Wisły pobranych w Krakowie w latach 2004-2021

W początkowych latach najwyższy średni poziom stężenia promieniotwórczego ^{137}Cs zanotowano w pierwszym roku badań (Rysunek 22.). Po czym obserwowano tendencję spadkową do roku 2008. W roku 2008 (jeden rok po powodzi), w analizowanym osadzie obserwowano niewielki wzrost stężeń ^{137}Cs spowodowany prawdopodobnie wymywaniem tego izotopu z gleby zlewiska do wody, a następnie jego kumulacją w osadzie dennym. Podwyższona średnia roczna zawartość ^{137}Cs w osadzie dennym w Tyńcu obserwowana w roku 2013 spowodowana została oznaczonym stężeniem tego izotopu w próbce wiosennej ($63,75 \text{ Bq kg}^{-1}$), 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 ^{137}Cs wynosiło jedynie $1,97 \text{ Bq kg}^{-1}$, ani badania wykonane w kolejnych latach. Średnia roczna zawartość ^{137}Cs w osadzie dennym w Tyńcu w 2021 roku wynosiła $3,19 \text{ Bq kg}^{-1}$.

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

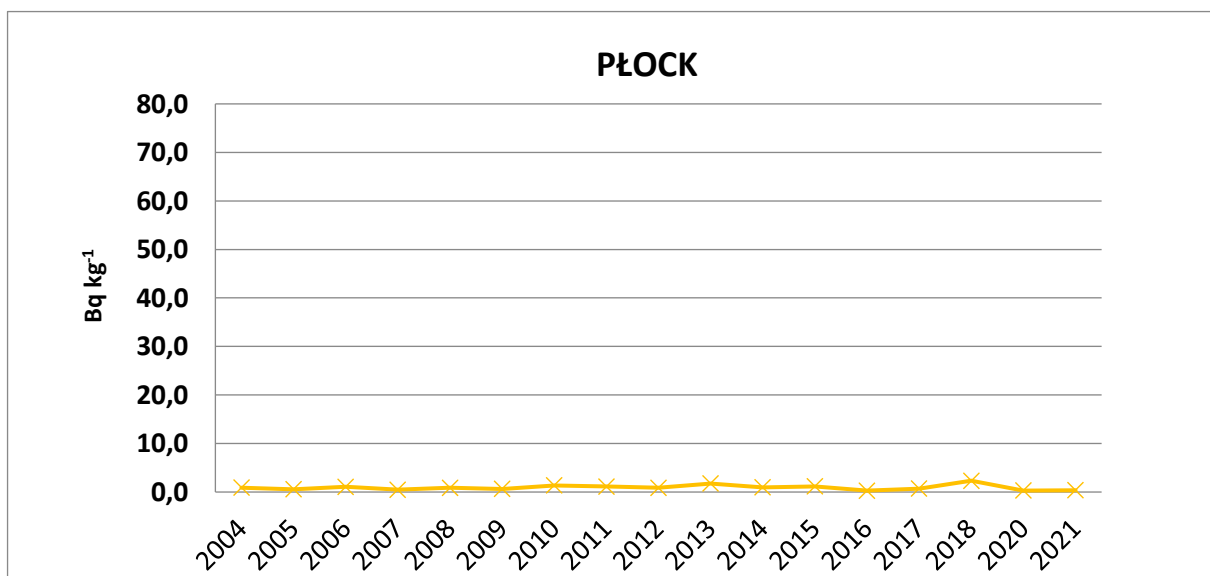


Rys. 23. Zawartość ^{137}Cs w osadach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2021

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. Najmniejsze wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs zmierzono w 2006 roku - $0,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ i 2012 – $1,3 \text{ Bq kg}^{-1}$.

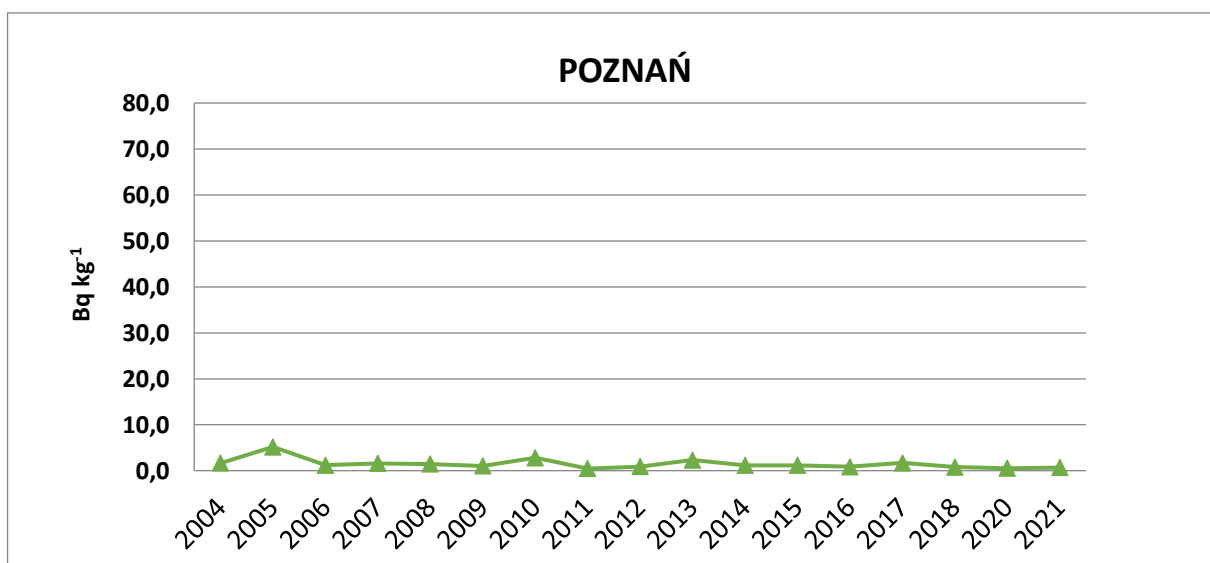
6.3.4. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Wisły w Płocku

Na przestrzeni wszystkich lat badań najbardziej wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs w osadach dennych obserwowano w punkcie poboru usytuowanym w Płocku (Rysunek 24.). 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. Średnia roczna zawartość ^{137}Cs w osadzie dennym w Płocku w 2021 roku wynosiła $0,33 \text{ Bq kg}^{-1}$.



Rys. 24. Zawartość ^{137}Cs w osadach z Wisły pobranych w Płocku w latach 2004-2021

6.3.5. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z Warty w Poznaniu

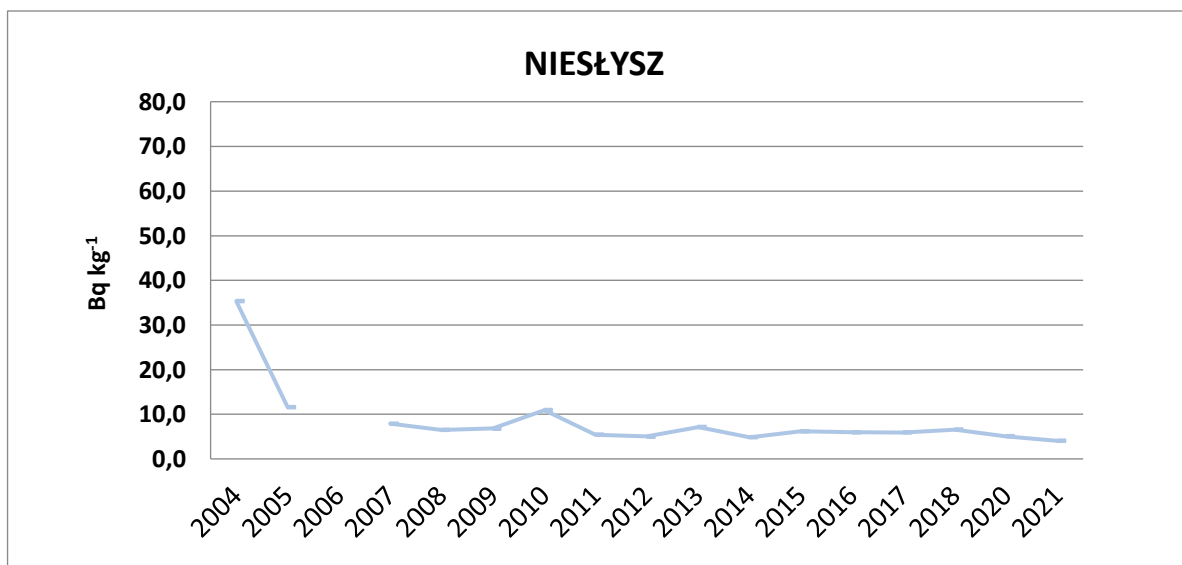


Rys. 25. Zawartość ^{137}Cs w osadach z Warty pobranych w Poznaniu w latach 2004-2021

Na przestrzeni wszystkich lat badań bardzo wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs w osadach dennych obserwowano w punkcie poboru usytuowanym w Poznaniu (Rysunek 25.). Nieznacznie wyższe wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano w pierwszych latach obserwacji. W kolejnych latach zawartość ^{137}Cs w osadach była na niskim poziomie i jednocześnie była dosyć stabilna. Zmiany mieszczą się w zakresie 4 Bq kg^{-1} . Prawdopodobnie spowodowane jest to bardziej stabilną sytuacją hydrologiczną niż w

przypadku pozostałych punktów poboru. W bieżącym roku oznaczono izotop cezu na poziomie $0,70 \text{ Bq kg}^{-1}$.

6.3.6. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z jeziora Niesłysz



Rys. 26. Zawartość ^{137}Cs w osadach jeziora Niesłysz pobranych w latach 2004-2021

Na Rysunku 26. pokazano przebieg czasowy średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w osadach jeziora Niesłysz w latach 2004–2021. W pierwszych latach prowadzenia badań obserwujemy tendencję spadkową. Od 2007 roku widzimy bardzo wyrównany poziom zawartości ^{137}Cs w kolejnych latach badawczych. Najbardziej stabilna sytuacja ma miejsce w ostatnich sześciu latach. Zakres zmian mieści się w przedziale ok. 2 Bq kg^{-1} .

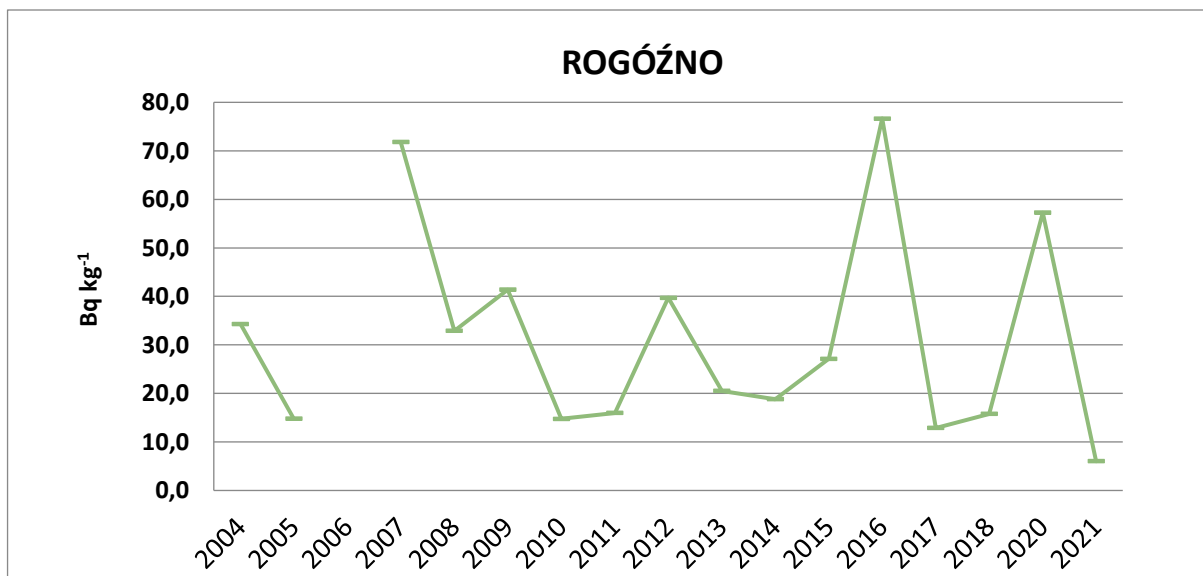
6.3.7. Analiza zawartości ^{137}Cs w osadzie pobranym z jeziora Rogóźno

Na Rysunku 27. pokazano przebieg czasowy średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs w osadach pobranych z jeziora Rogóźno w latach 2004 – 2021.

Najwyższe wartości średnich stężeń promieniotwórczych ^{137}Cs odnotowano w latach 2007, 2016 i 2020 wynosiły one odpowiednio: $71,9 \text{ Bq kg}^{-1}$; $76,7 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $57,3 \text{ Bq kg}^{-1}$. Natomiast w ostatnim roku oznaczono jedną z niższych zawartości tego izotopu cezu – $6,02 \text{ Bq kg}^{-1}$.

W przypadku tego punktu poboru występują znaczne zmiany zawartości izotopu ^{137}Cs w poszczególnych latach obserwacji. Poza tym podobnie jak w przypadku pozostałych

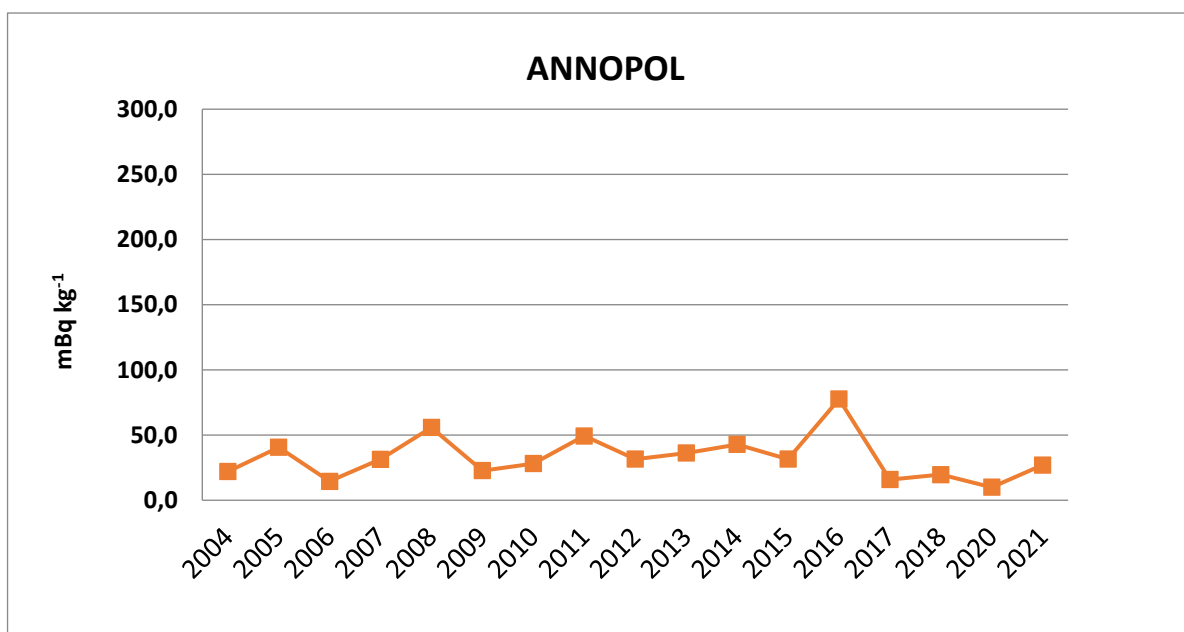
badanych izotopów zawartość ^{137}Cs jest na wyższym poziomie w stosunku do pozostałych punktów poboru prób.



Rys. 27. Zawartość ^{137}Cs w osadach jeziora Rogóźno pobranych w latach 2004-2021

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 Wisły w Annopolu



Rys. 28. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2021

Rysunek 28. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Annopolu w latach 2004-2021. 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.

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

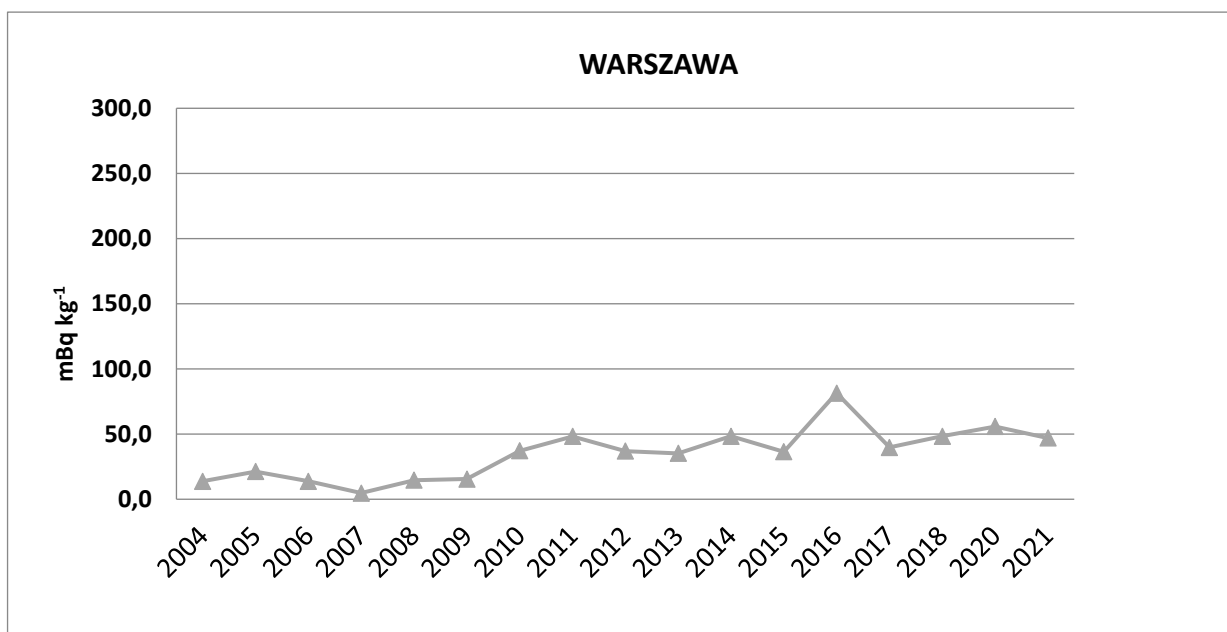
Rysunek 29. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Tyńcu w latach 2004-2021. Przedstawione wartości są średnimi rocznymi w kolejnych latach monitoringu. Zakres średnich stężeń określonych w latach 2004-2021 zawiera się od pojedynczych 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.



Rys. 29. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Wisły pobranych w Krakowie w latach 2004-2021

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

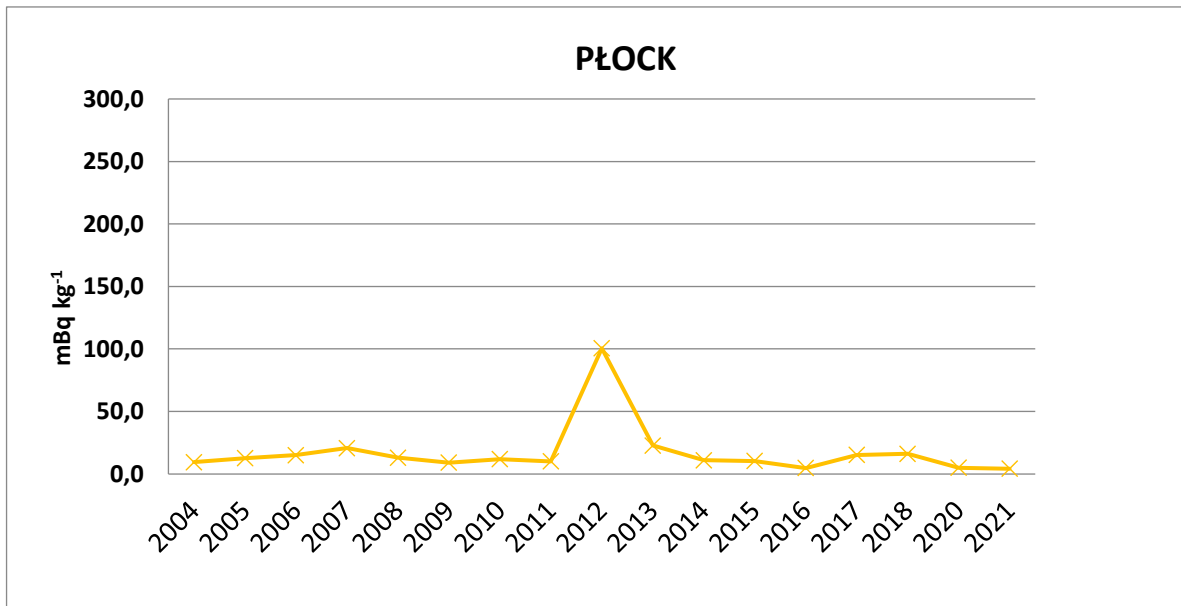
Rysunek 30. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z Wisły pobranych w Warszawie w latach 2004-2021. Do roku 2009 zawartość izotopów plutonu była bardzo wyrównana i nie przekraczała 25 mBq kg^{-1} . Po tym roku nastąpił nieznaczny wzrost stężenia, a w roku 2016 stężenie $^{239,240}\text{Pu}$ wyniosło $81,4 \text{ mBq kg}^{-1}$. 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 z przed 2016 roku.



Rys. 30. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach Wisły pobieranych w Warszawie w latach 2004-2021

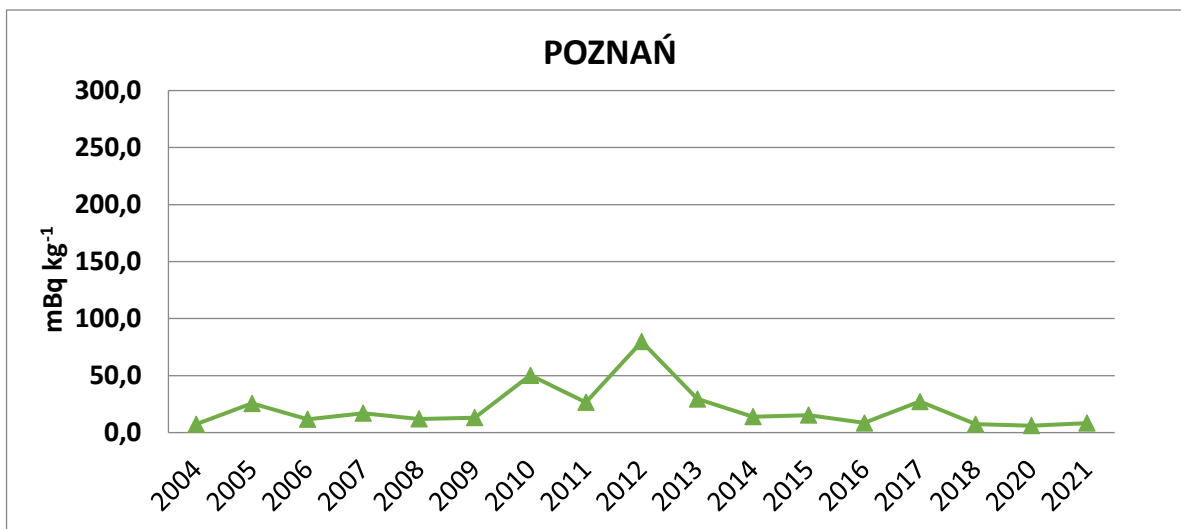
6.4.4. Analiza zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie pobranym z Wisły w Płocku

Średni poziom stężenia promieniotwórczego $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach pobieranych w Płocku w latach 2004-2021 był wyrównany (Rysunek 31.). 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 $4,23 \text{ mBq kg}^{-1}$.



Rys. 31. Zawartość ^{239,240}Pu w osadach Wisły pobranych w Płocku w latach 2004-2021

6.4.5. Analiza zawartości ^{239,240}Pu w osadzie pobranym z Warty w Poznaniu



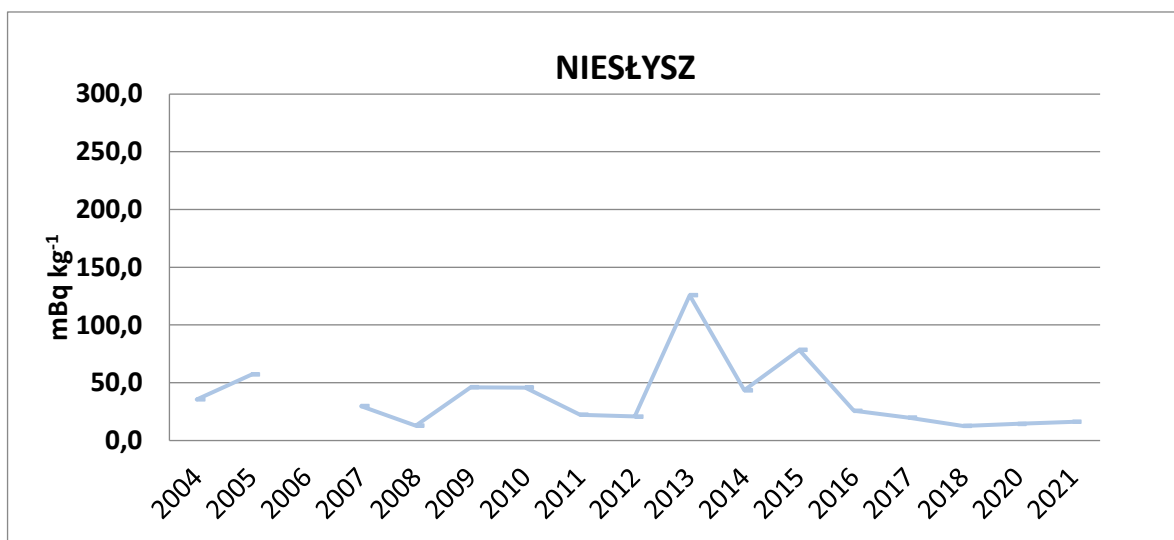
Rys. 32. Zawartość ^{239,240}Pu w osadach z Warty pobranych w Poznaniu w latach 2004-2021

Rysunek 32. przedstawia przebieg czasowy średnich stężeń promieniotwórczych ^{239,240}Pu w osadach z Warty pobieranych w Poznaniu w latach 2004-2021.

Średni poziom stężeń promieniotwórczego ^{239,240}Pu w osadach pobieranych w Poznaniu w latach 2004-2021 był mniej wyrównany niż dla izotopu cezu oznaczanego w tym

punkcie. Obserwujemy wyższe wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych $^{239,240}\text{Pu}$ w 2010 i 2012 roku, które wynosiły odpowiednio: $50,27 \text{ mBq kg}^{-1}$, $79,86 \text{ mBq kg}^{-1}$. Poza tymi dwoma wynikami zakres zmian mieścił się od $6,15 \text{ mBq kg}^{-1}$ w roku 2020 do $29,59 \text{ mBq kg}^{-1}$ w roku 2013.

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

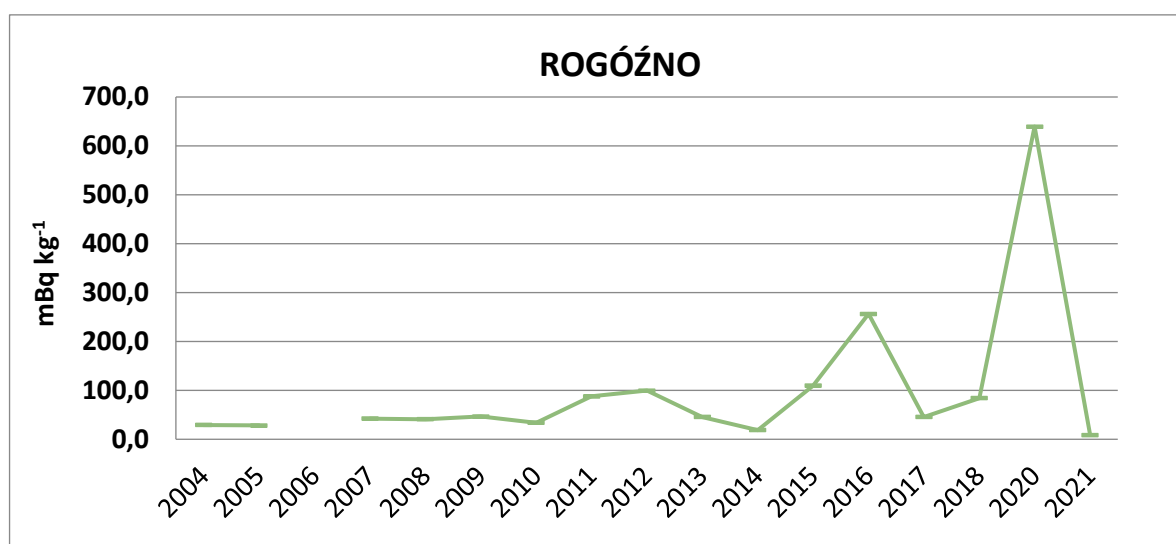


Rys. 33. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Niesłysz pobranych w latach 2004-2021

Z przedstawionej na Rysunku 33. zależności wynika, że w przeciągu wszystkich lat badań zmiany zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach jeziora Niesłysz miały bardziej zmienny przebieg niż w przypadku izotopu cezu. Podwyższoną zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ stwierdzono w osadzie w roku 2013. Odbiegającą wartość odnotowano w próbce pobranej wiosną, gdzie oznaczono stężenie promieniotwórcze izotopów plutonu na poziomie $192,73 \text{ mBq kg}^{-1}$. W próbce jesiennej nie odnotowano jednak już tak dużej wartości. Podobna sytuacja powtórzyła się w roku 2015, gdzie średnie roczne stężenie promieniotwórcze izotopów plutonu osiągnęło wartość $78,51 \text{ mBq kg}^{-1}$. Jednak kolejne lata badań nie potwierdziły stałości tej zmiany. W 2021 roku oznaczono izotopy plutonu na poziomie $16,25 \text{ mBq kg}^{-1}$.

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

Z przedstawionej na Rysunku 34. zależności wynika, że w latach 2004 – 2010 zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach pobranych z jeziora Rogóźno była na wyrównanym poziomie. W pozostałym okresie badawczym obserwujemy znacznie większe fluktuacje. Mieszczą się one w zakresie od około 20 do około 640 mBq kg^{-1} . Najwyższa średnia roczna zawartość izotopów plutonu uzyskana w 2020 roku spowodowana była wysokim oznaczeniem zawartości $^{239,240}\text{Pu}$ w osadzie zarówno wiosennym ($748,3 \text{ mBq kg}^{-1}$) jak i jesiennym ($530,2 \text{ mBq kg}^{-1}$). Analizy w bieżącym roku nie potwierdziły utrzymania się wysokiej zawartości izotopów $^{239,240}\text{Pu}$. Była ona najniższa od początku badań – $8,37 \text{ mBq kg}^{-1}$.



Rys. 34. Zawartość $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach z jeziora Rogóźno pobranych w latach 2004-2021

7. PODSUMOWANIE

Monitoring skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych w 2021 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 próbek. 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, Odry i jezior wynosiły odpowiednio 2,81; 3,10 i 2,96 mBq l⁻¹. Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{90}Sr w wodach dorzecza Wisły i Odry wynosiły 2,81, 3,67 mBq l⁻¹. Najniższą wartość uzyskano dla jezior 2,51 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 dorzecza Odry. Najmniejsze różnice w stężeniach zarówno ^{137}Cs jaki i $^{239,240}\text{Pu}$ obserwowano w osadach dennych pobranych z jezior.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych było na zbliżonym poziomie i wynosiło odpowiednio: dla dorzecza Wisły 2,28 Bq kg⁻¹, dla dorzecza Odry 2,12 Bq kg⁻¹ i dla jezior 2,84 Bq kg⁻¹.

W przypadku $^{239,240}\text{Pu}$ wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych były bardziej zbliżone dla osadów dorzecza Wisły i Odry, a niższe dla jezior i wynosiły odpowiednio: dla dorzecza Wisły – $18,08 \text{ mBq kg}^{-1}$, dla dorzecza Odry – $18,40 \text{ mBq kg}^{-1}$ i dla jezior – $9,11 \text{ mBq kg}^{-1}$.

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.

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 pozostają na niskim poziomie.

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