

# Radiologiczny monitoring gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie w latach 2014–2023

## *Radiological monitoring of the soil in the proximity of National Radioactive Waste Repository in Różan in years 2014–2023*

Michał Ochmański<sup>1</sup>, Krzysztof Isajenko<sup>2</sup>, Barbara Piotrowska<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

<sup>2</sup> Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Konwaliowa 7, 03-194 Warszawa, Polska

**Streszczenie:** W Polsce pomimo braku elektrowni jądrowych istnieją dwa miejsca związane z przetwarzaniem lub przechowywaniem substancji promieniotwórczych, które podlegają nadzorowi oraz kontroli radiologicznej w otoczeniu tu wymienionych ośrodków, tj.: Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku oraz Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie. Obydwa te ośrodki są monitorowane przez niezależne laboratoria. Badane są m.in. gleba, roślinność, aerozole z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego oraz wody źródlane i gruntowe. Przez długi okres takie badania prowadziło Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). W pracy zamieszczono wyniki badań gleby z ostatnich 10 lat. Dzięki stałemu monitoringowi radiologicznemu otoczenia KSOP można określić, czy składowane tam odpady wpływają na skażenie promieniotwórcze otoczenia. W pracy położono nacisk na analizę badań gleby z lat 2014–2023 poprzez porównanie stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych, takich jak: rad  $^{226}\text{Ra}$ , aktywność  $^{228}\text{Ac}$  oraz potas  $^{40}\text{K}$ , do średnich stężeń w Polsce oraz w województwie mazowieckim, w którym KSOP jest umiejscowiony. Dodatkowo, zbadana została depozycja ceszu  $^{137}\text{Cs}$ , który jest sztucznym izotopem promieniotwórczym pozostałym jeszcze z czasów awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu, ale i obecnym w składowanych w KSOP zużytych sztucznych źródłach promieniotwórczych.

**Słowa kluczowe:** Promieniotwórczość gleby, cesz  $^{137}\text{Cs}$ , rad  $^{226}\text{Ra}$ , potas  $^{40}\text{K}$ .

**Abstract:** Despite the lack of the nuclear power plant in Poland there are two facilities connected to processing or storing of the radioactive substances, which must be under radiological supervision and control. These facilities are National Nuclear Research Center (NCBJ) in Świerk and National Radioactive Waste Repository (KSOP) in Różan. Both of these facilities are monitored by independent laboratories. The concentrations of radionuclides in soil, vegetation, aerosols from the ground layer of air, groundwater and springwater are all assessed in those studies. For a long time such research was conducted by CLOR. This work compiles the results of such studies from the last 10 years. Thanks to continuous radiological monitoring of the proximity of the KSOP it is possible to determine, whether nuclear waste stockpiled there has an effect on the immediate environment. This work focuses on the analysis of the radiological measurements of soil samples from years 2014-2023 by comparing the concentration of the natural radionuclides, such as  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  and  $^{40}\text{K}$  to average concentration in Poland and Mazowieckie Voivodeship in which KSOP is situated. Additionally, the deposition of  $^{137}\text{Cs}$ , which is an artificial radionuclide left in soil as an aftermath of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident, is also measured.

**Keywords:** Radioactivity of soil, caesium  $^{137}\text{Cs}$ , radium  $^{226}\text{Ra}$ , potassium  $^{40}\text{K}$ .

## Wprowadzenie

Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie jest jedynym obiektem w Polsce służącym do składowania krótkożyciowych, nisko- i średnioaktywnych

odpadów promieniotwórczych oraz do okresowego przechowywania odpadów długożyciowych. Dodatkowo, w KSOP składowane są również zużyte i zamknięte źródła promieniotwórcze o krótkim czasie życia i o niskiej lub średniej aktywności.

Głównym sposobem zapobiegania przedostawaniu się odpadów do otoczenia, np. do wód gruntowych i do gleby, są warstwy betonu, oddzielające odpady od otoczenia. Odpady krótkożyciowe umieszcza się w metalowych bębnach, które następnie układa się w przeznaczonym dla nich miejscu i zalewa się betonem. Dodatkowo zabezpiecza się je przed opadami w taki sposób, aby woda nie przeniknęła do wnętrza betonu i nie powodowała korozji konstrukcji oraz przenikania odpadów do gleby.

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce i Europie przepisami prawnymi dotyczącymi przechowywania odpadów promieniotwórczych, takie jak Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, muszą być monitorowane radiologicznie. Monitorowaniem objęte są zarówno teren składowiska, jak i bliskie jego otoczenie.

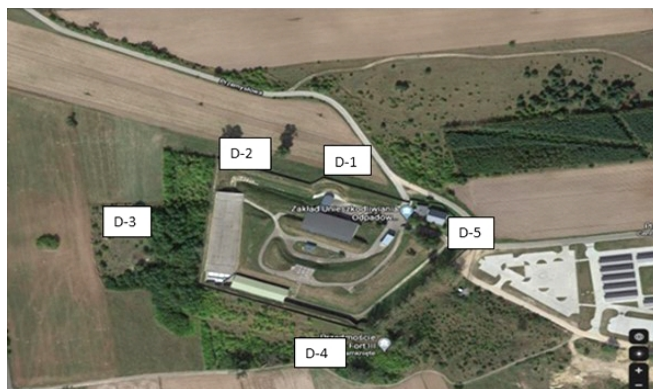
Na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej wykonuje kompleksowe pomiary, mające na celu ocenę sytuacji radiacyjnej w pobliżu KSOP. Pomiary te obejmują próbki gleby, trawy, aerozoli z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego oraz wód źródłanych i gruntowych. W pracy zamieszczono wyniki pomiarów próbek gleby z otoczenia KSOP z okresu 2014–2023.

## Badanie gleby

W ramach oceny radiologicznej środowiska w otoczeniu KSOP pobierano próbki gleby. Miejsca poboru próbek zostały wybrane tak, aby z każdej strony składowiska odpadów była możliwość oceny jego wpływu na środowisko (rys. 1). Pobór próbek odbywał się 2 razy w roku, przez co rocznie pobieranych było 10 próbek gleby. W próbkach rejestrowano izotopy gamma promieniotwórcze pochodzenia naturalnego, tj. dwóch naturalnych szeregów promieniotwórczych oraz potas  $^{40}\text{K}$ , a także izotopy gamma promieniotwórcze pochodzenia sztucznego. Z izotopów sztucznych rejestrowany był głównie cez  $^{137}\text{Cs}$  oraz w jednym roku odnotowano obecność ameryku  $^{241}\text{Am}$  i ceru  $^{141}\text{Ce}$ .

## Pobieranie próbek

Próbki gleby były pobierane w 5 miejscach pokazanych na rysunku 1 (oznaczonych symbolami od D-1 do D-5) z powierzchniowej warstwy gleby (o głębokości 10 cm) za pomocą metalowych wykrojników. Jedna z siedmiu części pobranej próby (pochodząca z jednego wykrojnika) znajdowała się w środku okręgu o promieniu 1 m, natomiast pozostałe sześć części na obwodzie tego okręgu. Pobrane w ten sposób składowe próbki były mieszane w worku i odpowiednio opisywane. Taki sposób poboru jest zalecany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu [1].



Rys. 1. Miejsca poboru próbek gleby w otoczeniu KSOP w Różanie (źródło: GoogleMaps).

Fig. 1. Soil sampling sites in the vicinity of the KSOP in Różanie.

## Przygotowanie próbek

Przed wykonaniem pomiarów pobrane próbki należało w odpowiedni sposób przygotować. W pierwszym kroku próbki rozdrobniono i pozbawiono zanieczyszczeń. Następnie tak przygotowaną glebę suszono w suszarce w temperaturze  $105^{\circ}\text{C}$  przez 16 h, po czym studzono do temperatury pokojowej. Po wyznaczeniu masy całkowitej próby oraz po rozdrobnieniu przesiewano przez sito o grubości oczek 2 mm i przesypywano do pojemników typu Marinelli o pojemności  $0,5\text{ dm}^3$ .

## Wykonanie pomiarów

Pomiary wykonywano metodą spektrometrii promieniowania gamma z użyciem detektora półprzewodnikowego HPGe o wydajności względnej około 40%, współpracującego z oprogramowaniem GENIE-2000. Czas pomiaru każdej próbki wynosił 80 000 sekund, przy którym dolny próg detekcji stężenia promieniotwórczego w próbkach gleby osiągnięty jest na poziomie  $0,05\text{ Bq/kg}$  dla cesu  $^{137}\text{Cs}$  oraz  $1\text{ Bq/kg}$  dla potasu  $^{40}\text{K}$ , radu  $^{226}\text{Ra}$  i aktynu  $^{228}\text{Ac}$ .

## Wyniki pomiarów

Widmo promieniowania gamma każdej próbki zostało przeanalizowane za pomocą programu GENIE-2000, gdzie uwzględniono również odpowiednią kalibrację wydajnościową i wcześniejszy pomiar tła.

W tabelach 1–3 zamieszczono stężenia promieniotwórcze naturalnych izotopów promieniotwórczych odpowiednio  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  i  $^{40}\text{K}$  wraz z niepewnościami oraz wartości średnie tych stężeń dla pięciu punktów poboru w latach 2014–2023 podane w  $\text{Bq/kg}$ .

Na rysunkach 2–5 przedstawiono wykresy stężeń promieniotwórczych  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{40}\text{K}$  oraz  $^{137}\text{Cs}$  w zależności

**Tabela 1.** Stężenie promieniotwórcze  $^{226}\text{Ra}$  w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.**Table 1.** Radioactive concentration of  $^{226}\text{Ra}$  in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

Rad $^{226}\text{Ra}$	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	18,1±0,7 20,4±0,7	14,9±0,6 18,3±0,7	10,6±0,4 11,9±0,5	13±0,4 14,6±0,6	15,9±0,6 16,1±0,6	21-05-2014 09-09-2014
2015	21,9±0,8 33,4±1,3	31,0±0,9 30,6±1,2	28,5±0,8 22,9±1,0	17,0±0,7 27,6±0,9	38,6±1,0 30,2±0,9	26-05-2015 09-09-2015
2016	18,7±0,5 21,9±0,8	16,4±0,5 18,1±0,7	11,5±0,5 16,7±0,6	15,4±0,5 16,3±0,7	21,0±0,5 18,2±0,7	12-05-2016 06-09-2016
2017	23,3±1,9 22,4±1,9	22,7±0,8 21,9±1,0	21,3±1,0 11,1±0,7	18,8±1,5 20,0±1,0	28,3±1,2 22,6±1,0	30-05-2017 27-09-2017
2018	24,4±1,0 21,4±1,0	19,6±0,9 19,7±0,9	11,9±0,6 13,9±0,7	21,0±0,9 17,1±0,8	18,4±1,5 12,1±0,6	26-06-2018 18-10-2018
2019	22,6±1,8 27,3±1,2	22,7±1,8 22,5±1,0	13,6±0,7 20,1±0,9	19,0±1,6 20,9±0,9	15,4±0,8 14,2±0,8	04-06-2019 17-09-2019
2020	43,0±3,5 23,1±1,9	40,8±3,3 21,9±1,8	20,1±1,7 17,0±1,4	15,8±1,3 18,5±1,5	20,8±1,7 14,6±1,2	05-05-2020 09-09-2020
2021	21,4±1,1 20,8±1,0	18,6±1,0 19,9±1,0	10,8±0,6 10,8±0,6	18,2±1,0 17,8±0,9	14,0±0,8 14,8±0,8	13-08-2021 11-09-2021
2022	22,1±0,9 22,8±1,0	18,4±0,8 18,1±0,8	9,0±0,4 9,1±0,5	18,0±0,7 15,3±0,7	13,0±0,6 13,5±0,6	24-06-2022 14-09-2022
2023	36,1±1,8 20,5±1,0	32,4±1,6 18,8±0,9	30,3±1,6 17,2±0,8	18,6±0,8 16,0±0,8	24,1±1,3 13,3±0,7	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	24,3±1,3	22,4±1,1	15,9±0,8	18,0±0,9	19,0±0,9	-

**Tabela 2.** Stężenie promieniotwórcze  $^{228}\text{Ac}$  w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.**Table 2.** Radioactive concentration of  $^{228}\text{Ac}$  in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

Aktywność $^{228}\text{Ac}$	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	23,5±0,6 23,7±0,6	18,0±0,5 20,2±0,5	10,5±0,3 14,1±0,4	16,5±0,4 16,1±0,5	15,4±0,4 16,6±0,5	21-05-2014 09-09-2014
2015	25,5±0,6 22,1±0,8	20,7±0,6 20,3±0,7	18,7±0,6 14,3±0,5	19,2±0,5 18±0,6	20,7±0,6 18,5±0,6	26-05-2015 09-09-2015
2016	23,2±0,5 24,5±0,6	20,1±0,4 21,3±0,5	13,4±0,4 18,6±0,5	18,1±0,4 19,2±0,6	21,9±0,5 18,4±0,5	12-05-2016 06-09-2016
2017	24,3±0,6 23,9±0,7	21,7±0,6 21,0±0,6	16,8±0,5 10,7±0,3	17,4±0,5 19,4±0,5	21,8±0,6 20,3±0,6	30-05-2017 27-09-2017
2018	23,9±0,6 24,1±0,6	20,5±0,6 19,0±0,5	11,1±0,3 13,1±0,4	18,6±0,5 15,9±0,4	18,3±0,5 11,9±0,4	26-06-2018 18-10-2018
2019	23,6±0,6 25,3±0,7	21,0±0,6 21,3±0,6	12,9±0,4 19,5±0,5	17,3±0,5 17,9±0,5	14,0±0,4 13,9±0,4	04-06-2019 17-09-2019
2020	23,6±0,9 23,9±0,6	20,1±0,7 20,9±0,6	11,8±0,5 16,0±0,4	13,3±0,4 16,4±0,5	18,6±0,5 13,7±0,4	05-05-2020 09-09-2020
2021	24,4±0,6 25,1±0,6	21,1±0,8 21,5±0,5	11,7±0,3 11,2±0,3	18,4±0,6 17,1±0,4	13,7±0,4 13,4±0,4	13-08-2021 11-09-2021
2022	23,8±0,6 24,7±0,8	20,3±0,5 18,6±0,6	8,4±0,2 9,4±0,3	17,3±0,4 13,6±0,4	12,3±0,3 11,9±0,4	24-06-2022 14-09-2022
2023	23,1±0,8 24,0±0,6	20,0±0,7 19,5±0,5	17,9±0,6 17,0±0,4	18,1±0,5 16,2±0,4	12,5±0,4 13,1±0,3	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	24,0±0,7	20,4±0,6	13,9±0,4	17,2±0,5	16,0±0,5	-

**Tabela 3.** Stężenie promieniotwórcze  $^{40}\text{K}$  w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.  
**Table 3.** Radioactive concentration of  $^{40}\text{K}$  in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

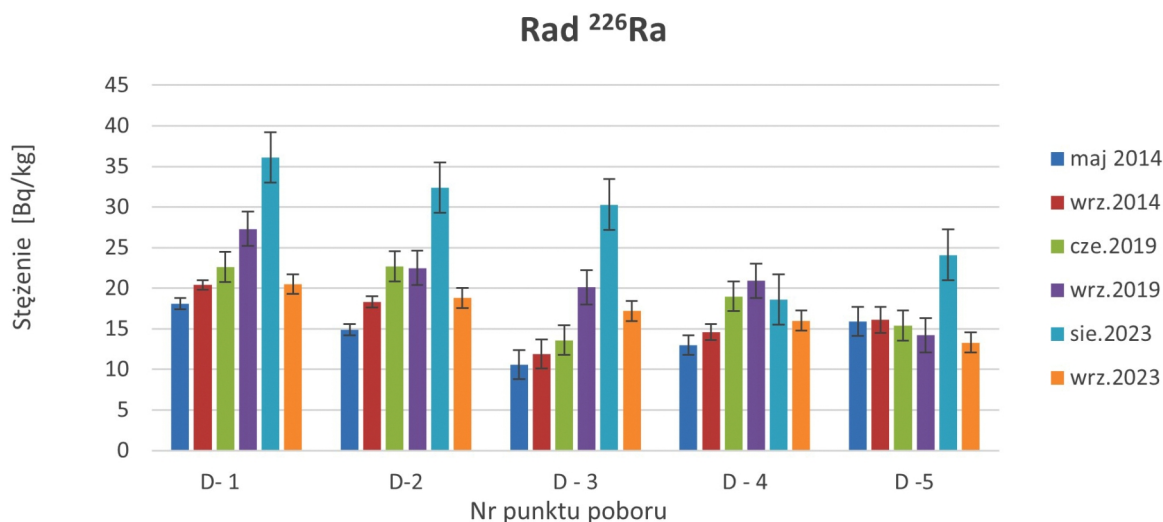
Potas $^{40}\text{K}$	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	588±13 618±14	506±13 562±13	383±9 426±10	453±12 475±11	388±9 424±10	21-05-2014 09-09-2014
2015	598±13 533±12	535±7 495±11	488±6 402±9	491±11 434±7	394±5 387±5	26-05-2015 09-09-2015
2016	547±7 569±13	504±7 534±12	381±9 421±11	462±6 483±13	400±5 406±9	12-05-2016 06-09-2016
2017	596±34 569±34	538±20 528±20	411±16 343±13	461±26 477±18	401±15 442±17	30-05-2017 27-09-2017
2018	578±21 567±21	491±19 460±17	336±13 387±15	468±18 404±15	444±26 358±14	26-06-2018 18-10-2018
2019	573±33 596±23	538±31 533±20	371±14 411±16	456±26 453±17	390±15 398±15	04-06-2019 17-09-2019
2020	587±33 572±33	543±31 546±31	363±21 410±23	398±23 430±25	478±27 388±22	05-05-2020 09-09-2020
2021	517±13 572±13	526±15 535±12	362±8 329±7	469±13 430±10	392±11 386±9	13-08-2021 11-09-2021
2022	541±11 566±16	497±10 481±12	280±6 301±7	417±9 360±9	338±7 345±8	24-06-2022 14-09-2022
2023	551±12 557±12	497±11 509±11	473±10 433±9	458±9 421±9	370±8 380±8	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	570±19	518±16	386±12	445±14	395±12	-

od punktu, z którego były pobierane próby. Dane do wykresów zostały wzięte z trzech losowo wybranych lat.

Na rysunkach 2–4 stężenia promieniotwórcze izotopów naturalnych nie wykazują dużych zmian dla poszczególnych punktów pomiarowych (zwłaszcza stężenia  $^{228}\text{Ac}$  i  $^{40}\text{K}$ ). Niewielkie fluktuacje zauważyć można dla stężeń  $^{226}\text{Ra}$ , jednak w zestawieniu 10-letnim możemy wyznaczyć wartości średnie stężeń promieniotwórczych poprzez obliczenie wartości średniej z 5 punktów. Dla  $^{137}\text{Cs}$  sytu-

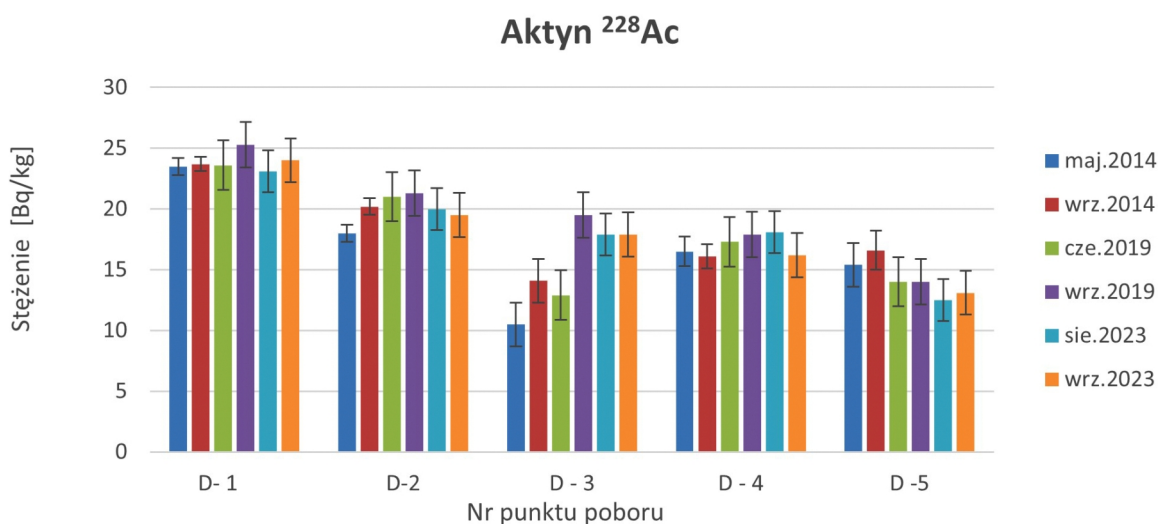
acja wygląda nieco inaczej. Stężenia promieniotwórcze mogą znacząco się różnić w zależności od miejsca poboru, dlatego w tym przypadku kolejne serie danych będą odpowiadały innym miejscom pomiaru.

Z uwagi na to, że w wyniku działalności człowieka (np. katastrofa w Czarnobylu) w środowisku naturalnym jest obecny cez, w opracowaniu przedstawiono depozycję cezu w 10 cm warstwie gleby dla badanych punktów D-1–D-5 pokazanych na rysunku 1.



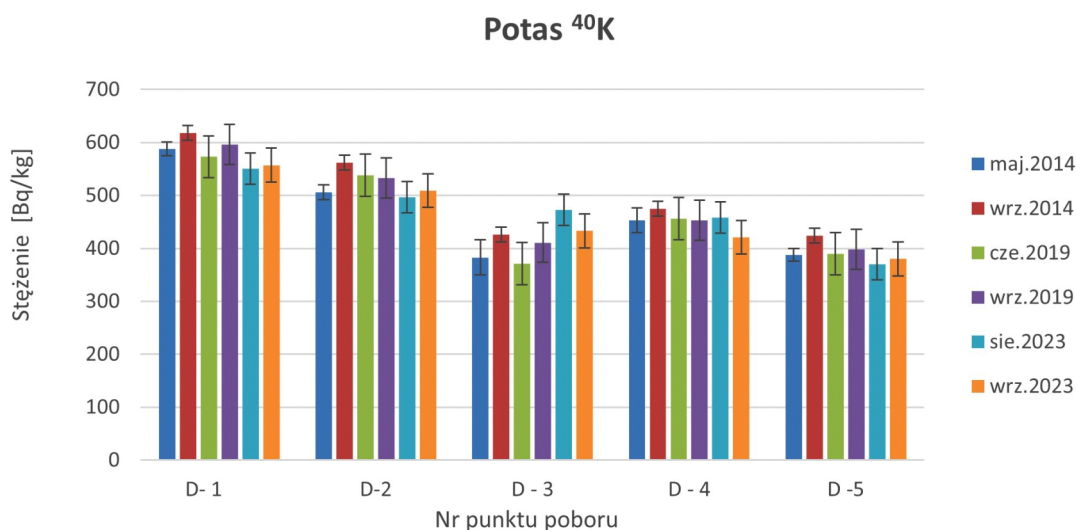
**Rys. 2.** Stężenie promieniotwórcze radu  $^{226}\text{Ra}$  w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

**Fig. 2.** Radioactive concentration of radium  $^{226}\text{Ra}$  at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



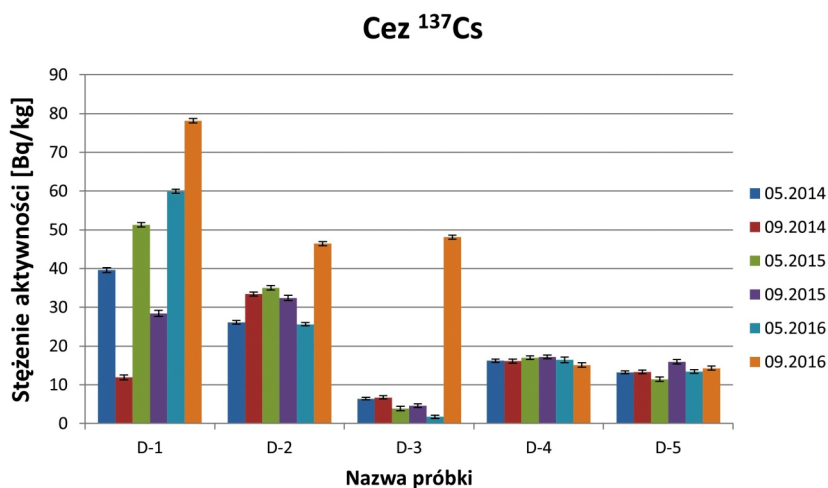
**Rys. 3.** Stężenie promieniotwórcze aktynu  $^{228}\text{Ac}$  w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

**Fig. 3.** Radioactive concentration of actinium  $^{228}\text{Ac}$  at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



**Rys. 4.** Stężenie promieniotwórcze potasu  $^{40}\text{K}$  w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

**Fig. 4.** Radioactive concentration of potassium  $^{40}\text{K}$  at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



**Rys. 5.** Stężenie promieniotwórcze cezu  $^{137}\text{Cs}$  w miejscach poboru próbek w latach 2014–2016 (autor: Michał Ochmański).

**Fig. 5.** Radioactive concentration of caesium  $^{137}\text{Cs}$  at sampling sites in 2014–2016 (author: Michał Ochmański).

Stężenie cezu  $^{137}\text{Cs}$  zostało przeliczone na depozycję wyrażaną w  $\text{kBq}/\text{m}^2$  za pomocą wzoru:

$$Dep \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2} = \frac{S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}}{1000} \frac{M[\text{kg}]}{7 P[\text{m}^2]} \frac{S M}{1750 D^2} \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2}$$

gdzie:  $S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$  oznacza stężenie promieniotwórcze cezu

$^{137}\text{Cs}$ ,

$M[\text{kg}]$  to całkowita masa pobranej próbki, a

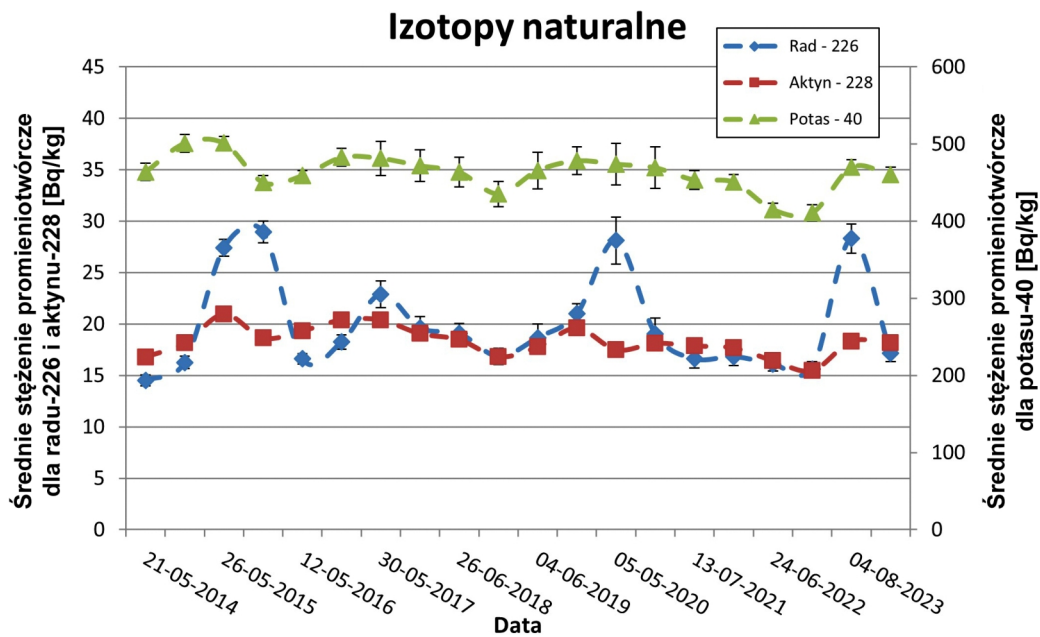
$P = \frac{D^2}{4} [\text{m}^2]$  jest polem powierzchni, z której pobiera

rana jest gleba za pomocą wykrojnika o średnicy  $D$ .

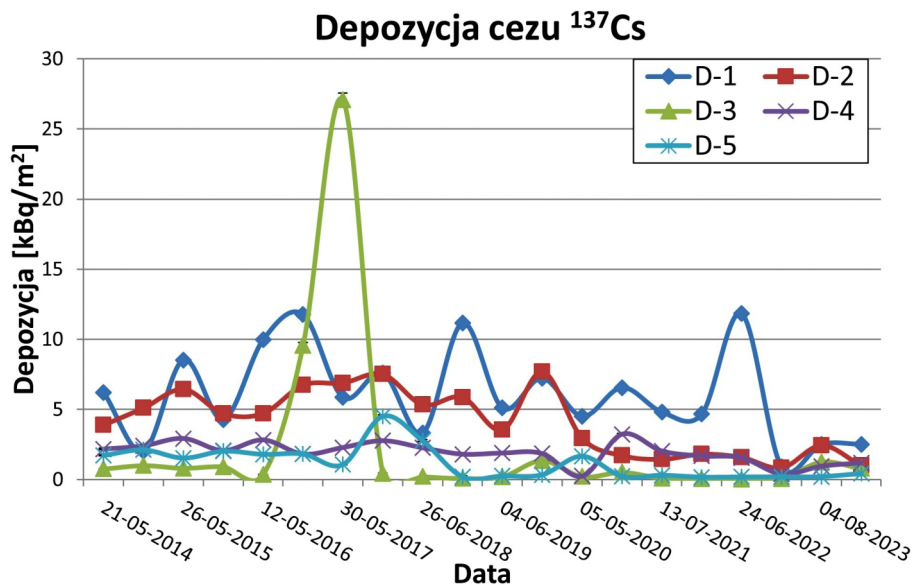
W roku 2022 wykryto 2 dodatkowe sztuczne izotopy promieniotwórcze, tj. ameryk  $^{241}\text{Am}$  oraz cer  $^{141}\text{Ce}$ .

Ameryk został wykryty tylko w próbce pochodzącej z punktu D-1, jego stężenie promieniotwórcze wynosiło  $0,88 \pm 0,22 \text{ Bq}/\text{kg}$  w próbce pobranej dnia 24.06.2022, natomiast stężenie promieniotwórcze w próbce z dnia 14.09.2022 znajdowało się poniżej granicy detekcji wynoszącej  $0,58 \text{ Bq}/\text{kg}$ .

Sztuczny izotop ceru  $^{141}\text{Ce}$  został wykryty w próbach pochodzących z punktów D-2, D-3 i D-4. Jego stężenia zawierają się w tabeli 5.



Rys. 6. Średnie stężenie promieniotwórcze potasu  $^{40}\text{K}$ , radu  $^{226}\text{Ra}$  i aktynu  $^{228}\text{Ac}$  w próbkach gleby w latach 2014–2023 (autor: Michał Ochmański).  
 Fig. 6. Average radioactive concentration of potassium  $^{40}\text{K}$ , radium  $^{226}\text{Ra}$  and actinium  $^{228}\text{Ac}$  in soil samples in 2014–2023 (author: Michał Ochmański).



Rys. 7. Depozycja cezu  $^{137}\text{Cs}$  w latach 2014–2023 w kolejnych miejscach poboru próbek pokazanych na rysunku 1 (autor: Michał Ochmański).  
 Fig. 7. Deposition of cesium  $^{137}\text{Cs}$  in the years 2014–2023 at the subsequent sampling locations shown in Fig. 1 (author: Michał Ochmański).

**Tabela 4.** Stężenie promieniotwórcze ceru  $^{141}\text{Ce}$  w próbkach gleby pomierzone w roku 2022 wyrażone w Bq/kg.**Table 4.** Deposition of cesium  $^{137}\text{Cs}$  in soil samples from subsequent sampling sites, in kBq/m<sup>2</sup>.

Cez $^{137}\text{Cs}$	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	6,20±0,11 2,02±0,03	3,89±0,10 5,10±0,09	0,76±0,01 1,00±0,02	2,17±0,05 2,40±0,04	1,71±0,03 2,11±0,05	21-05-2014 09-09-2014
2015	8,53±0,15 4,27±0,08	6,45±0,04 4,70±0,09	0,81±0,01 0,91±0,02	2,92±0,05 2,06±0,01	1,52±0,01 2,02±0,01	26-05-2015 09-09-2015
2016	9,95±0,05 11,76±0,20	4,71±0,04 6,74±0,12	0,36±0,01 9,56±0,20	2,82±0,02 1,81±0,05	1,79±0,01 1,82±0,04	12-05-2016 06-09-2016
2017	5,86±0,13 7,60±0,20	6,89±0,14 7,52±0,15	27,07±0,47 0,43±0,02	2,28±0,06 2,76±0,07	1,06±0,02 4,52±0,08	30-05-2017 27-09-2017
2018	3,31±0,07 11,15±0,22	5,34±0,11 5,87±0,11	0,21±0,01 0,09±0,01	2,26±0,05 1,80±0,03	2,76±0,07 0,18±0,07	26-06-2018 18-10-2018
2019	5,10±0,12 7,23±0,14	3,55±0,08 7,69±0,15	0,21±0,01 1,36±0,03	1,89±0,05 1,85±0,04	0,25±0,01 0,33±0,01	04-06-2019 17-09-2019
2020	4,50±0,10 6,56±0,15	2,95±0,07 1,71±0,04	0,21±0,01 0,52±0,01	0,25±0,01 3,23±0,07	1,66±0,04 0,22±0,01	05-05-2020 09-09-2020
2021	4,81±0,10 4,66±0,08	1,44±0,04 1,82±0,04	0,11±0,01 0,05±0,01	2,03±0,05 1,68±0,04	0,30±0,01 0,17±0,01	13-08-2021 11-09-2021
2022	11,82±0,17 0,90±0,02	1,59±0,03 0,84±0,02	0,03±0,01 0,04±0,01	1,56±0,02 0,40±0,02	0,18±0,01 0,19±0,01	24-06-2022 14-09-2022
2023	2,50±0,05 2,52±0,05	2,44±0,04 0,99±0,02	1,25±0,02 0,79±0,02	0,95±0,02 1,19±0,02	0,20±0,01 0,42±0,01	04-08-2023 13-09-2023

**Tabela 5.** Stężenie promieniotwórcze ceru  $^{141}\text{Ce}$  w próbkach gleby pomierzone w roku 2022 wyrażone w Bq/kg.**Table 5.** Radioactive concentration of cerium  $^{141}\text{Ce}$  in soil samples measured in 2022, in Bq/kg.

Cer $^{141}\text{Ce}$	D-2	D-3	D-4
24-06-2022	0,32±0,06	0,15±0,04	0,38±0,06
14-09-2022	0,79±0,13	0,20	0,25

## Analiza wyników

Stężenie promieniotwórcze potasu  $^{40}\text{K}$  w latach 2014–2023 zawierało się w granicach od 280 Bq/kg zarejestrowane w 2022 roku dla punktu D-3 do 618 Bq/kg uzyskane w 2014 roku w punkcie D-1. Stężenie promieniotwórcze radu  $^{226}\text{Ra}$  wahało się od 9 Bq/kg zarejestrowane w 2022 roku w punkcie D-3 do 43 Bq/kg w 2020 roku w punkcie D-1, natomiast w przypadku aktynu  $^{228}\text{Ac}$  stężenie promieniotwórcze wynosiło od około 8,4 Bq/kg w 2022 roku w punkcie D-3 do 25,5 Bq/kg w 2015 roku w punkcie D-1.

Poziom stężenia promieniotwórczego izotopów naturalnych utrzymuje się na dość stałym poziomie, jednakże widać pewne piki na wykresie radu  $^{226}\text{Ra}$ . Skoki te utrzymują się jednak w zakresie stężeń standardowym dla tego izotopu radu, więc nie poświęcono im więcej uwagi.

Poziomy stężenie promieniotwórczych izotopów naturalnych nie odbiegają znacząco od wartości średnich dla Polski. Średnie stężenie radu  $^{226}\text{Ra}$  w Polsce wynosi:  $31 \pm 1,6$  Bq/kg w zakresie od 6,4 do 154,7 Bq/kg, natomiast w województwie mazowieckim, w którym znajduje się też

KSOP, średnie stężenie wynosi 15,9 Bq/kg. W przypadku aktynu  $^{228}\text{Ac}$  w Polsce średnie stężenie wynosi 30,5 Bq/kg w zakresie od 6 do 129,2 Bq/kg, a w województwie mazowieckim średnie stężenie wynosi 15,9 Bq/kg. Średnie stężenia promieniotwórcze dla województwa mazowieckiego są przekraczane w pewnych miejscach, ale z racji tego, że poziomy stężenie oscylują wokół pewnych wartości średnich, to samo miejsce, w którym były wykonywane pomiary, raz ten poziom średni przekracza, a w następnym roku znajduje się poniżej wartości średniej. Zmiany takie są normalne dla gleby, ponieważ izotopy promieniotwórcze przemieszczają się wraz z glebą i ich poziomy będą się wahać wraz z upływem czasu.

W przypadku potasu  $^{40}\text{K}$  średnie stężenie promieniotwórcze w Polsce wynosi  $497 \pm 15$  Bq/kg w zakresie od 138 do 1046 Bq/kg, gdzie w województwie mazowieckim średnie stężenie wynosi 382 Bq/kg. Jest to jedyny izotop, który przekracza średnie stężenie w województwie mazowieckim dla każdego miejsca pomiarowego, jednakże przekracza go o wartości, które mogą być przypisane innej strukturze gleby.

Średnie stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych w województwie mazowieckim jest mniejsze niż średnie stężenie dla całej Polski, co widać również w zmierzonych średnich stężeniach radu oraz aktynu, które były mniejsze niż średnie stężenia w Polsce. Wyjątkiem tutaj jest potas, którego stężenie jest bliskie stężeniom krajowym i przekraczało średnie stężenia w województwie mazowieckim.

W przypadku depozycji cezu  $^{137}\text{Cs}$  widoczne są znaczne wahania w czasie oraz duża zależność wartości depozycji od badanego miejsca. Sugeruje to, że w niektórych miejscach, tj. tych, w których poziom ten jest dość stały, zawartość cezu w glebie jest wynikiem wcześniejszych zdarzeń, np. awarii w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, natomiast punkty, w których depozycja jest większa (punkt D-1) i zmienna w czasie (punkt D-3), mogą sugerować, że „nadmiarowy” cez pochodzi ze składowiska.

Średnia wartość depozycji cezu  $^{137}\text{Cs}$  w Polsce wynosi  $1,96 \pm 0,19 \text{ kBq/m}^2$  w zakresie od 0,20 do  $16,63 \text{ kBq/m}^2$ , natomiast w województwie mazowieckim średnia depozycja wynosi  $1,58 \pm 0,39 \text{ kBq/m}^2$  w zakresie od 0,25 do  $7,09 \text{ kBq/m}^2$ , a więc wartość średnia jest mniejsza dla województwa mazowieckiego niż ta z całego kraju. Biorąc pod uwagę, że ten izotop cezu nie występuje naturalnie, możemy spodziewać się większych wartości depozycji na skoncentrowanych obszarach, co może być spowodowane np. miejscowymi opadami deszczu z chmur skażonych po awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu lub skażeniem wynikającym np. z uszkodzonego źródła cezowego. Wartości depozycji w otoczeniu KSOP są generalnie większe niż wartości średnie zarówno dla Polski, jak i województwa mazowieckiego, jednakże są to dalej wartości, które nie wpływają w znaczący sposób negatywnie na człowieka i środowisko.

## Podsumowanie

Monitoring radiologiczny gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie wykazał obecność we wszystkich pięciu próbkach izotopów pochodzenia naturalnego, tj. potasu  $^{40}\text{K}$ , radu  $^{226}\text{Ra}$  i aktynu  $^{228}\text{Ac}$  oraz jednego izotopu pochodzenia sztucznego – cezu  $^{137}\text{Cs}$ . Stężenia promieniotwórcze izotopów naturalnych utrzymują się na stałym poziomie i związane są z budową geologiczną terenu. Natomiast obecność

depozycji cezu  $^{137}\text{Cs}$  powodowana działalnością człowieka utrzymuje się na niskim poziomie. Obliczona depozycja  $^{137}\text{Cs}$  w badanych próbkach gleby jest porównywalna z depozycją tego izotopu otrzymaną dla gleby województwa mazowieckiego (z wyjątkiem punktu D-1), co świadczy o możliwości jego pochodzenia z czasu awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu [2].

Biorąc pod uwagę powyższe badania, obecność Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie nie wpływa niekorzystnie pod względem gamma promieniotwórczym na otoczenie wspomnianej lokalizacji.

## Notka o autorach

**Michał Ochmański** – student 3-go roku Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej (PW), kierunek fizyka techniczna, specjalność fizyka komputerowa. Odbывał praktyki studenckie w Zakładzie Dozymetrii Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) – w czasie praktyk zajmował się pracami związanymi z radiologicznym monitoringiem otoczenia Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie.

**Krzysztof Isajenko** – kierownik Zakładu Dozymetrii CLOR, zastępca dyrektora CLOR w latach 2006–2019, kierownik akredytowanego Laboratorium Pomiarów Promieniotwórczości Naturalnej. Absolwent Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej (PW), wieloletni członek Komisji Badania Morza Polskiej Akademii Nauk, wykładowca na Wydziale Fizyki PW, uczestnik wielu szkoleń dotyczących ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądrowego (zarówno krajowych, jak i zagranicznych), autor lub współautor wielu publikacji związanych z tą tematyką.

**Barbara Piotrowska** – absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (specjalność: fizyka jądrowa). Pracownik Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii (WiChIR) w latach 1996–2009. Od 2009 roku pracownik CLOR, zastępca kierownika Zakładu Dozymetrii i kierownik ds. technicznych w akredytowanym Laboratorium Pomiarów Promieniotwórczości Naturalnej CLOR. Od wielu lat zajmuje się spektrometrią promieniowania gamma. Prowadzi badania i szkolenia w zakresie pomiarów promieniotwórczości naturalnej w surowcach i materiałach budowlanych. Przeprowadza ekspertyzy radiologiczne.

## Literatura

1. „Measurement of Radionuclides In Food and the Environment”, A Guidebook IAEA, Technical Reports Series No. 295, 1989.
2. „Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach państwowego monitoringu środowiska w latach 2022–2024, Zadanie 3: Monitoring stężenia cezu-137 w glebie” – K. Isajenko, O. Stawarz, B. Piotrowska, K. Wojtkowski, praca dla GIOŚ luty-marzec 2024 r.
3. <https://www.gov.pl/web/polski-atom/krajowe-skladowisko-odpadow-promieniotworczych> dostęp dnia 12.08.2024.