



K. Kozak, J. Mazur, M. Bonczyk, K. Wołoszczuk,
M. Wysocka, J. Olszewski, D. Grzędziel, J. Lukas

RADON

W MIEJSCACH PRACY I W BUDYNKACH MIESZKALNYCH

Dobre praktyki pomiarowe i zalecane działania



Krzysztof Kozak, Jadwiga Mazur, Michał Bonczyk,
Katarzyna Wołoszczuk, Małgorzata Wysocka,
Jerzy Olszewski, Dominik Grządziel, Jakub Lukas

**Radon w miejscach pracy
i w budynkach mieszkalnych –
dobre praktyki pomiarowe
i zalecane działania**

Krzysztof Kozak
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN), Kraków

Jadwiga Mazur
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN), Kraków

Michał Bonczyk
Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy (GIG-PIB), Katowice

Katarzyna Wołoszczuk
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR), Warszawa

Małgorzata Wysocka
Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy (GIG-PIB), Katowice

Jerzy Olszewski
Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr med. Jerzego Nofera (IMP), Łódź

Dominik Grzędziel
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN), Kraków

Jakub Lukas
Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN), Kraków

Ten utwór jest dostępny w modelu open access na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 międzynarodowa (CC BY 4.0) – <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ISBN 978-83-63253-75-2

Redakcja
Małgorzata Wojciechowska

Korekta
Barbara Krupińska

Skład
Edyta Olejnik

Wydawca
Oficina Wydawnicza
Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr med. Jerzego Nofera
ul. Świętej Teresy od Dzieciątka Jezus 8, 91-348 Łódź

2026

SPIS TREŚCI

Słowo wstępne	5
Słownik terminów	7
Przepisy dotyczące radonu w prawie polskim	10
Powiaty, w których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia	11
1. Radon – informacje ogólne	13
2. Promieniotwórczy radon w budynkach	16
3. Metody pomiaru stężenia radonu w budynkach	19
4. Dobre praktyki pomiarowe	22
4.1. Procedura pomiarów stężenia radonu	22
4.2. Szczegółowe zalecenia dotyczące miejsc pomiarów i liczby detektorów	24
5. Dawki od radonu w miejscach pracy	32
5.1. Metodyka obliczenia dawki	32
5.2. Kwalifikacja pracowników do kategorii narażenia na promieniowanie jonizujące	35
6. Zalecane działania w przypadku zarejestrowania stężenia radonu >300 Bq/m ³	36
Laboratoria posiadające akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (PCA) w zakresie pomiarów stężenia radonu w budynkach	41
Instytucje tworzące sieć naukową Polskie Centrum Radonowe (PCRn)	42
Źródła danych	43

Aneks 1. Stężenie radonu w budynkach	47
Aneks 2. Specyfika wykonywania pomiarów w podziemnych zakładach górniczych (kopalniach)	53
Aneks 3. Specyfika wykonywania pomiarów w podziemnych trasach turystycznych	57
Aneks 4. Wyrażenie stężenia energii potencjalnej promieniowania α produktów rozpadu radonu C_α (J/m ³) za pomocą wartości stężenia radonu C_{Rn} (Bq/m ³)	61

SŁOWO WSTĘPNE

Monitorowanie stężenia radonu (gazu promieniotwórczego) to nie tylko wymóg prawny, ale i kluczowy element bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) z uwagi na oddziaływanie promieniowania jonizującego na organizm człowieka.

Jak prawidłowo zorganizować pomiary radonu i co zrobić w przypadku zarejestrowania stężenia radonu powyżej poziomu odniesienia, tj. >300 Bq/m³?

Przedstawiamy kompleksowy poradnik dla pracodawców, służby BHP i zarządców nieruchomości, który systematyzuje wiedzę na temat radonu, dróg jego wnikania do wnętrza budynku, dobrych praktyk pomiarowych, interpretacji wyników oraz zalecanych działań.

W poradniku wskazano działania, jakie należy podjąć, aby skutecznie realizować obowiązki wynikające z przepisów Prawa atomowego oraz zaleceń służb sanitarnych. Przedstawiono również sposób obliczania dawek radonu dla narażonych pracowników.

Poradnik zawiera także zalecenia dotyczące pomiarów stężenia radonu w specyficznych środowiskach pracy, takich jak m.in. obiekty podziemne (np. trasy turystyczne), kopalnie i miejsca uzdatniania wód podziemnych.

Mamy nadzieję, że opracowanie to pomoże zapewnić bezpieczeństwo radiologiczne pracowników i mieszkańców.

Autorzy

SŁOWNIK TERMINÓW

Aktywność nuklidu promieniotwórczego (A) – wielkość fizyczna równa szybkości rozpadu promieniotwórczego jąder atomowych danej próbki (średnia liczba samoistnych przemian jądrowych dokonujących się w danej ilości nuklidu w przedziale czasowym). Jednostką jest bekerel (Bq): $1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$.

Czas połowicznego rozpadu / okres półroczu ($T_{1/2}$) – czas, po którym połowa jąder promieniotwórczych izotopu ulega rozpadowi. Jest to stała charakterystyczna dla każdego izotopu, niezależna od liczby jąder.

Dawka graniczna – wartość dawki promieniowania jonizującego, wyrażona jako dawka skuteczna lub równoważna, dla określonych grup osób, pochodząca od kontrolowanej działalności zawodowej, której nie wolno przekroczyć poza przypadkami przewidzianymi w ustawie.

Dawka skuteczna (efektywna) – suma dawek równoważnych pochodzących od zewnętrznego i wewnętrznego narażenia, wyznaczona z uwzględnieniem odpowiednich współczynników wagowych narządów lub tkanek, obrazująca narażenie całego ciała. Jednostką jest siwert (Sv).

Ekspozycja detektora (pomiar) – umieszczenie detektora na określony czas w badanym pomieszczeniu.

Ekspozycja (wielkość fizyczna) – iloczyn stężenia radonu i czasu jego oddziaływania. Jednostką jest bekerel razy godzina na metr sześcienny ($\text{Bq} \cdot \text{h/m}^3$).

Energia potencjalna promieniowania α (produktów rozpadu radonu) – całkowita energia promieniowania α wyemitowana podczas rozpadu produktów rozpadu radonu, aż do izotopu ^{210}Pb (z wyłączeniem tego izotopu), oraz toronu i produktów jego rozpadu, aż do stabilnego izotopu ^{208}Pb .

Krótkożyciowe pochodne radonu – promieniotwórcze produkty rozpadu radonu (izotopy polonu ^{218}Po i ^{214}Po , izotopy ołowiu ^{214}Pb i bizmutu ^{214}Bi).

Poziom odniesienia – wartość średniorocznego stężenia radonu wynosząca 300 Bq/m^3 . Jeśli wynik pomiaru stężenia radonu w miejscu pracy wewnątrz pomieszczeń wskazuje, że mógł zostać przekroczony poziom odniesienia, kierownicy jednostek podejmują działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon.

Radon – gaz szlachetny, izotop ^{222}Rn pierwiastka o liczbie atomowej 86.

Stężenie energii potencjalnej promieniowania α (C_p) – energia potencjalna promieniowania α wyemitowana przez promieniotwórcze jądra zawarte w jednostce objętości powietrza. Jednostką jest džul na metr sześcienny powietrza (J/m^3).

Stężenie radonu (C_{Rn}) – aktywność radonu w jednostce objętości powietrza. Jednostką jest bekerel na metr sześcienny powietrza (Bq/m^3).

Stężenie równoważne radonu (C_{eq}) (ekwiwalentne stężenie radonu) – stężenie aktywności radonu będącego w równowadze z produktami rozpadu, które jest równoważne rzeczywistemu stężeniu energii potencjalnej promieniowania α przy braku równowagi promieniotwórczej. Jego wartość otrzymuje się, mnożąc stężenie radonu C_{Rn} przez współczynnik równowagi F. Jednostką jest bekerel na metr sześcienny powietrza (Bq/m^3).

Stwierdzenie zgodności – porównanie otrzymanego wyniku pomiaru stężenia radonu powiększonego o niepewność rozszerzoną ($k = 2$, $p = 95\%$) z wartością poziomu odniesienia średniorocznego stężenia radonu, tj. 300 Bq/m^3 .

Średnioroczne stężenie radonu – wartość stężenia radonu oszacowana na podstawie pomiarów w okresie nie krótszym niż miesiąc, odpowiadająca średniemu stężeniu radonu w powietrzu w roku kalendarzowym.

Toron – gaz szlachetny, izotop ^{220}Rn pierwiastka o liczbie atomowej 86.

Współczynnik równowagi (F) – stosunek ekwiwalentnego stężenia równowagowego radonu do rzeczywistego stężenia radonu; ekwiwalentne stężenie równowagowe radonu jest stężeniem radonu będącego w równowadze z krótkożyciowymi produktami rozpadu, przy którym stężenie energii potencjalnej promieniowania α jest takie samo, jak stężenie potencjalnej energii promieniowania α rzeczywistej, nierównowagowej mieszaniny izotopów.

PRZEPISY DOTYCZĄCE RADONU W PRAWIE POLSKIM

(stan na marzec 2026 r.)

- Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (DzU z 2026 r., poz. 1)
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (DzU z 2020 r., poz. 1139)
- Obwieszczenie Ministra Zdrowia w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy (Monitor Polski z 2021 r., poz. 169)
- Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (DzU z 2021 r., poz. 1657)
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (DzU z 2017 r., poz. 2294)
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 9 stycznia 2026 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo geologiczne i górnicze (DzU z 2026 r., poz. 69)
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (DzU z 2021 r., poz. 1617)

POWIATY, W KTÓRYCH ŚREDNIOROCZNE STĘŻENIE PROMIENIOTWÓRCZE RADONU W POWIETRZU WEWNĄTRZ POMIESZCZEŃ W ZNACZNEJ LICZBIE BUDYNKÓW MOŻE PRZEKRACZAĆ POZIOM ODNIESIENIA

W Załączniku Rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (DzU z 2020 r., poz. 1139), wskazano tereny, o których mowa w art. 23b ustawy Prawo atomowe (DzU z 2026 r., poz. 1). W załączniku tym wymieniono 27 powiatów położonych w 6 województwach, w których pracodawcy mają obowiązek wykonać pomiary stężenia radonu zgodnie z art. 23c ustawy Prawo atomowe:

1. W województwie dolnośląskim:
 - 1) powiat dzierżoniowski
 - 2) powiat jeleniogórski (od 1.01.2021 r. powiat karkonoski)
 - 3) miasto na prawach powiatu Jelenia Góra
 - 4) powiat kamiennogórski
 - 5) powiat kłodzki
 - 6) powiat lubański
 - 7) powiat lwówecki
 - 8) powiat polkowicki
 - 9) powiat trzebnicki
 - 10) powiat wałbrzyski
 - 11) miasto na prawach powiatu Wałbrzych
 - 12) powiat ząbkowicki
 - 13) powiat zgorzelecki
 - 14) powiat złotoryjski

2. W województwie lubelskim:
 - 1) powiat tomaszowski
3. W województwie opolskim:
 - 1) powiat nyski
 - 2) powiat prudnicki
4. W województwie podkarpackim:
 - 1) powiat bieszczadzki
 - 2) powiat jasielski
 - 3) powiat krośnieński
 - 4) powiat leski
 - 5) powiat mielecki
 - 6) powiat sanocki
5. W województwie śląskim:
 - 1) powiat cieszyński
6. W województwie świętokrzyskim:
 - 1) powiat kielecki
 - 2) powiat opatowski
 - 3) powiat skarżyski

1. Radon – informacje ogólne

Promieniowanie jonizujące jest nieodłącznym elementem środowiska naturalnego. Pochodzi zarówno ze źródeł naturalnych, jak i sztucznych, powstałych w wyniku działalności człowieka. Substancje mineralne budujące skorupę ziemską zawierają naturalne pierwiastki promieniotwórcze (izotopy), których czas połowicznego rozpadu ($T_{1/2}$) jest porównywalny do wieku Ziemi (4,5 miliarda lat) lub dłuższy. Ulegając przemianom promieniotwórczym, izotopy te emitują promieniowanie (α , β lub γ) powodujące jonizację ośrodka (tj. powstawanie jonów dodatnich i ujemnych), dlatego promieniowanie to nazywane jest promieniowaniem jonizującym.

Najpowszechniej występujące naturalne izotopy promieniotwórcze pochodzą z szeregu uranowego (^{238}U), torowego (^{232}Th) i potasowego (^{40}K). W szeregach uranowym i torowym występują izotopy radonu, który jest jedynym gazowym naturalnym pierwiastkiem promieniotwórczym. W szeregu promieniotwórczym zaczynającym się od izotopu uranu ^{238}U występuje rad (^{226}Ra) o $T_{1/2}$ wynoszącym ok. 1600 lat. Podczas rozpadu radu powstaje izotop radonu (^{222}Rn).

Radon został odkryty w 1900 r. przez niemieckiego chemika Friedricha Ernsta Dorna. Należy do grupy helowców, czyli gazów szlachetnych, jest cięższy od powietrza, niewidoczny, nie ma zapachu ani smaku, czyli nie jest wykrywalny za pomocą zmysłów. Łatwo rozpuszcza się w wodzie i niektórych rozpuszczalnikach organicznych. Podstawowe właściwości radonu przedstawiono w tabeli 1.

Na rycinie 1 przedstawiono schemat rozpadu radonu w szeregu uranowym. Radon rozpada się, emitując cząstki α , na inne izotopy, także promieniotwórcze, tzw. krótkożyciowe pochodne radonu będące metalami ciężkimi: polon (^{218}Po , ^{214}Po), bizmut (^{214}Bi) i ołów (^{214}Pb).

Tabela 1. Podstawowe właściwości radonu

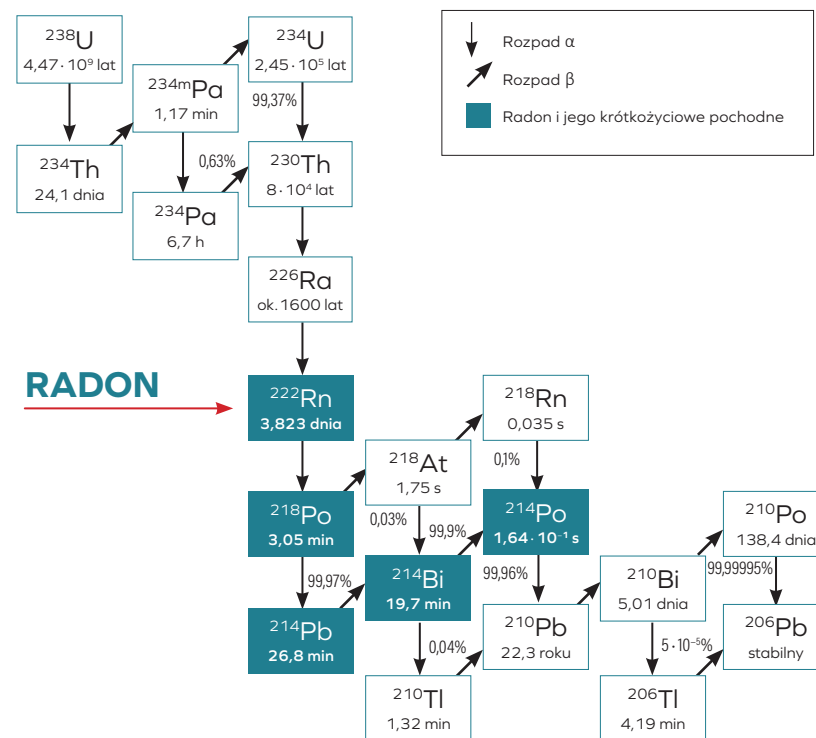
Parametr	Symbol	Wartość
Okres półrozpadu	$T_{1/2}$	$3,8232 \pm 0,0008$ dnia
Współczynnik dyfuzji w powietrzu	D_a	$1 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
Współczynnik dyfuzji w wodzie	D_w	$1 \cdot 10^{-9}$ m ² /s
Aktywność właściwa		$5,6922 \cdot 10^{15} \pm 0,0012 \cdot 10^{15}$ Bq/g
Gęstość (warunki normalne)	ρ	9,96 g/dm ³
Liczba masowa/atomowa	A/Z	222/86 (86 protonów + 136 neutronów)

Ze wszystkich naturalnych źródeł promieniowania na powierzchni Ziemi radon stwarza największe zagrożenie radiologiczne dla człowieka. Według Raportu Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki z 2024 r. jego udział w średniej rocznej dawce skutecznej jest bardzo wysoki i wynosi ok. 47% dla źródeł naturalnych i ok. 25% w całkowitej rocznej dawce skutecznej promieniowania jonizującego otrzymanej przez statystycznego mieszkańca Polski.

Radon jest gazem, więc może się przemieszczać, a długi $T_{1/2}$ umożliwia mu wędrówkę (migrację) w środowisku od miejsca powstania (grunt) do powietrza atmosferycznego lub przestrzeni zamkniętych, takich jak budynki, jaskinie, tunele itp.

Średnie stężenie radonu w powietrzu atmosferycznym utrzymuje się na poziomie 10–50 Bq/m³, ale w niektórych miejscach wynosi tylko ok. 1 Bq/m³, a w innych >100 Bq/m³.

Obecność promieniotwórczego radonu i jego promieniotwórczych pochodnych rozpadu w powietrzu, którym oddy-



Rycina 1. Szereg uranowy – schemat rozpadów promieniotwórczych

chają ludzie, ma zatem wpływ na ich zdrowie. Zagrożenie radiologiczne stwarzają głównie krótkożyciowe pochodne rozpadu radonu, tj. izotopy polonu (²¹⁸Po i ²¹⁴Po), ołowiu (²¹⁴Pb) i bizmutu (²¹⁴Bi), które łączą się z aerozolami obecnymi w powietrzu, wnikają do układu oddechowego i mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia poprzez zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia chorób nowotworowych dróg oddechowych. Radon jest kancerogenem grupy I.

Według raportu „World Health Organization handbook on indoor radon” z 2009 r. badania epidemiologiczne przeprowa-

dzane na całym świecie potwierdziły wpływ obecności radonu w domach na wzrost ryzyka zachorowania na nowotwory płuca. Przyjmuje się, że 3–14% nowotworów płuca występujących na świecie jest wywołanych przez radon – dlatego został on uznany za czynnik kancerogenny. Wpływ radonu na powstawanie nowotworów płuca jest większy u osób palących. Nie określono progowego stężenia, poniżej którego nie występowałoby ryzyko zachorowania. Nawet bardzo małe stężenie tego gazu zwiększa ryzyko. Uważa się, że początkowa indukcja nowotworu może nastąpić w wyniku uszkodzenia pojedynczej komórki – dlatego nawet pojedyncza cząstka α pochodząca z jednego atomu radonu może wywołać niepożądaną mutację. Większość nowotworów płuca wywołanych obecnością radonu jest spowodowana ekspozycją na niskie i średnie stężenia, rzadko na wysokie.

2. Promieniotwórczy radon w budynkach

Głównym źródłem radonu w atmosferze i w budynkach jest radon wydostający się spod powierzchni ziemi. Jego stężenie w gruncie jest bardzo wysokie (tysiące Bq/m³: 1 Bq to 1 rozpad promieniotwórczy atomu w ciągu 1 s).

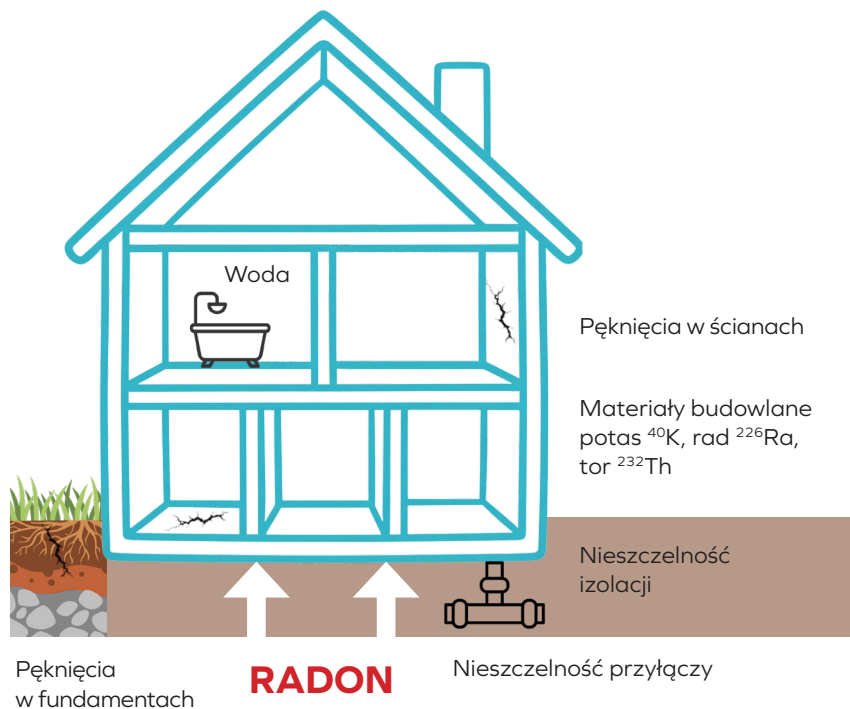
W gruncie zachodzą 2 procesy: emanacja, czyli wydostawanie się atomów radonu z ziaren minerałów do przestrzeni międzyziarnowej, a następnie transport tych atomów drogą dyfuzji i konwekcji, głównie w kierunku powierzchni gleby. Zjawisko przejścia radonu z gleby do powietrza atmosferycznego to ekshalacja. W powietrzu atmosferycznym następuje szybkie „rozrzedzenie” radonu, a tym samym znaczny spadek jego stężenia. Stopień ekshalacji radonu z gruntu zależy od rodzaju gleby,

geologii podłoża, a także od warunków atmosferycznych (ciśnienie, siła i prędkość wiatru, wilgotność, obecność pokrywy śnieżnej itp.).

Inaczej jest w przypadku budynków. Budowa domu wymaga przebicia powierzchni gleby i dotarcia do głębszych warstw gruntu, w których stężenie radonu jest znacznie wyższe i zależne od stężenia radu (²²⁶Ra) w skałach podłoża. Zatem stężenie radonu w budynku zależy przede wszystkim od rodzaju podłoża, na jakim on stoi, a w szczególności od budowy geologicznej, w tym występowania uskoków tektonicznych, ponieważ stanowią one doskonałą drogę migracji radonu z głębszych warstw ziemi. Nie mniejsze znaczenie mają parametry gruntu, takie jak przepuszczalność lub porowatość, które wpływają na transport radonu. W budynkach występuje także tzw. efekt kominowy, czyli „wysysanie” radonu z gruntu ze względu na różnicę temperatur i ciśnienia powietrza pomiędzy wewnętrzną a zewnętrzną częścią budynku. Innym źródłem radonu we wnętrzu mogą być materiały budowlane. Radon uwalnia się też z wody i gazu, które są wykorzystywane w obiektach. Udział różnych źródeł radonu w budynkach przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Źródła radonu w budynkach [wg UNSCEAR, 1988]

Źródło radonu	Stężenie [%]
Podłoże gruntowe	78
Materiały budowlane	12
Powietrze atmosferyczne	9
Woda	0,2
Gaz ziemny	0,6



Rycina 2. Główne drogi wnikania radonu do budynku

Główne drogi wnikania radonu do budynku przedstawiono na rycinie 2. Są to:

- pęknięcia i szczeliny w fundamentach,
- konstrukcyjne szczeliny dylatacyjne,
- pęknięcia w ścianach fundamentowych, które mają bezpośredni kontakt z podłożem,
- nieszczelności technologiczne w połączeniach ścian,
- nieszczelności wokół przepustów instalacyjnych.

Istotnym czynnikiem, który wpływa na stężenie radonu w budynku, jest wentylacja pomieszczeń (naturalna, tzw. grawitacyjna, lub wymuszona). Prawidłowe wietrzenie pomieszczeń powoduje znaczny spadek stężenia radonu. Warto zaznaczyć,

że na wyższych kondygnacjach zmniejsza się wpływ radonu docierającego z podłoża, a zwiększa radonu uwalnianego się z wody lub materiałów budowlanych ścian i stropów budynku, a także z pokrycia ścian i podłóg. Przyczyną wysokiego stężenia radonu na wyższych kondygnacjach może być wadliwie działająca wentylacja przenosząca radon z niższych kondygnacji, np. z piwnicy.

Stężenie radonu wewnątrz budynku ulega zmianom dobowym i sezonowym. Dzieje się tak zarówno ze względu na odmiennie warunki atmosferyczne panujące w różnych porach dnia i roku, jak i z powodu innego trybu życia mieszkańców w tych okresach.

Występowanie radonu w budynkach opisano szczegółowo w Aneksie 1.

3. Metody pomiaru stężenia radonu w budynkach

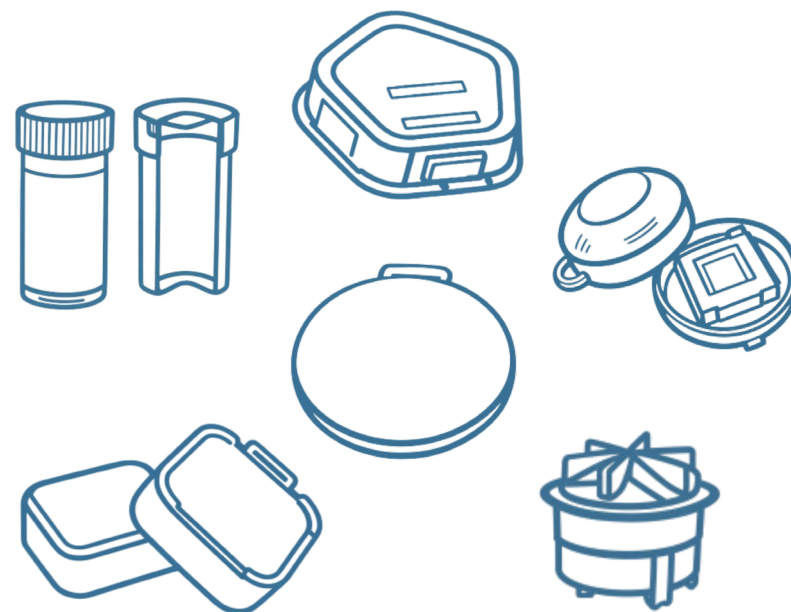
Pomiar stężenia radonu w budynkach wykonywany jest metodami aktywnymi (za pomocą mierników) i pasywnymi (za pomocą detektorów). Podstawową charakterystykę obu metod przedstawiono w tabeli 3.

W przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy krajowy plan działania zaleca stosowanie metody pasywnej z użyciem detektorów śladowych do pomiaru stężenia radonu wewnątrz pomieszczeń.

Detektor składa się z plastikowego pojemnika (komory dyfuzyjnej), wewnątrz którego znajduje się właściwy detektor radonu, tj. płytką wykonaną najczęściej z poliwęglanu allilodiglikolowego (*polyallyl diglycol carbonate* – PADC) (CR-39). Zdecydowanie rzadziej stosowany jest materiał poliestrowy

Tabela 3. Aktywne i pasywne metody pomiaru stężenia radonu w budynkach

Metody aktywne	Metody pasywne
pomiar przeprowadzany za pomocą mierników	pomiar przeprowadzany za pomocą detektorów
wymagają zasilania	nie wymagają zasilania
pomiar wartości chwilowych	pomiar wartości średniego stężenia w czasie ekspozycji detektora
ciągła rejestracja zmian stężenia w czasie pomiaru	brak możliwości rejestracji zmian stężenia w czasie pomiaru
wymagane regularne wzorcowanie mierników	wymagane regularne wzorcowanie systemu odczytu detektorów
wynik odczytywany na miejscu bezpośrednio w czasie pomiaru	wynik po odczycie z detektora w laboratorium
konieczny nadzór i obsługa	w zasadzie bezobsługowe
większe rozmiary, możliwa generacja dźwięków (np. praca pompki do zasysania powietrza)	niewielkie rozmiary, niekłopotliwy pomiar, nie generują hałasu podczas pomiaru
średni/wysoki koszt jednostkowego pomiaru	niski koszt jednostkowego pomiaru
umożliwiają identyfikację dróg wnikania radonu do budynku	nie pozwalają zidentyfikować dróg wnikania radonu do budynku



Rycina 3. Różne rodzaje komór dyfuzyjnych detektorów pasywnych do pomiaru stężenia radonu wewnątrz budynków

z warstwą azotanu celulozy (LR-115). W czasie ekspozycji detektora, czyli w czasie pomiaru stężenia radonu, do pojemnika wnika (dyfunduje) gazowy radon z otoczenia.

Na rycinie 3 pokazano różne rodzaje komór dyfuzyjnych detektorów do pomiaru stężenia radonu wewnątrz budynków.

Radon oraz jego pochodne wytworzone wewnątrz komory dyfuzyjnej rozpadają się, emitując cząstki α , które uszkadzają

wiązania chemiczne w materiale płytki, tworząc niewidoczne ślady. W wyniku wytrawiania chemicznego w stężonym roztworze wodorotlenku sodu oraz podwyższonej temperaturze ślady te stają się widoczne pod mikroskopem. Komputerowa analiza mikroskopowego obrazu powierzchni płytki pozwala obliczyć liczbę śladów. Ich gęstość (liczba śladów na 1 cm^2 płytki) odpowiada liczbie cząstek α , które je wytworzyły, a więc jest proporcjonalna do stężenia aktywności radonu w powietrzu. Wykorzystując współczynnik kalibracji, na podstawie zarejestrowanej gęstości śladów oblicza się stężenie radonu w miejscu ekspozycji detektora.

4. Dobre praktyki pomiarowe

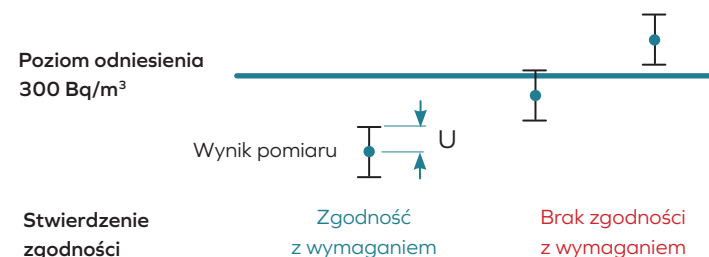
4.1. Procedura pomiarów stężenia radonu

Pomiaru stężenia radonu wewnątrz budynków dokonuje się w kilku etapach:

- kontakt klienta z laboratorium – wspólne opracowanie strategii pomiarów: określenie rodzaju budynku, liczby i powierzchni pomieszczeń oraz ich przeznaczenia, liczby koniecznych detektorów, miejsca ekspozycji;
- przekazanie detektorów przez laboratorium – detektory przesyłane są z instrukcją przeprowadzenia pomiarów, arkuszem ekspozycji i ankietą dotyczącą budynku. Aby zapobiec przypadkowej ekspozycji, zaleca się wybór najszybszej formy wysyłki oraz unikanie nadawania ich przed dniami wolnymi od pracy;
- ekspozycja detektorów przez klienta – rozmieszczenie detektorów zgodnie z uzgodnioną strategią;
- zwrot detektorów do laboratorium – szczelne zapakowanie detektorów (strunowa torebka foliowa, pakowanie próżniowe itp.) zgodnie z instrukcją. Aby zapobiec przypadkowej ekspozycji, zaleca się wybór najszybszej formy wysyłki oraz unikanie nadawania ich przed dniami wolnymi od pracy;
- odczyt detektorów w laboratorium – rejestracja przyjęcia detektorów w laboratorium, odpowiedni sposób ich przechowywania przed odczytem, archiwizacja detektorów oraz danych źródłowych i wyników;
- sprawozdanie z badań dla klienta – wyniki pomiarów wraz z niepewnością oraz stwierdzenie zgodności (art. 23c pkt 3 ustawy Prawo atomowe). Wyniki należy podawać zawsze z całkowitą rozszerzoną niepewnością pomiarową U oszacowaną dla poziomu ufności $p = 95\%$ (współczynnik rozszerzenia $k = 2$).

Uwagi

Przy stwierdzaniu zgodności z wymaganiem przyjęto zasadę tzw. binarnego stwierdzania zgodności z zastosowaniem pasma ochronnego o szerokości równej wyznaczonej rozszerzonej niepewności U stężenia radonu (na podstawie dokumentu ILAC-G8:09/2019). Oznacza to, że wynik powiększa się o niepewność rozszerzoną ($k = 2$), porównuje z wymaganiem lub specyfikacją podaną w przepisach prawa i stwierdza, czy wskazuje możliwość przekroczenia poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu, tj. 300 Bq/m^3 podanego w art. 23b ustawy Prawo atomowe (rycina 4).



Rycina 4. Zasada binarnego stwierdzania zgodności

Przykład

wynik + niepewność $< 300 \text{ Bq/m}^3$ nie wskazują na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu

wynik + niepewność $\geq 300 \text{ Bq/m}^3$ wskazują na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu

- Aby zminimalizować ryzyko stwierdzenia przekroczenia dla wyników znajdujących się w tzw. obszarze pasma ochronnego, należy zminimalizować niepewność pomiarową.
- Jeśli zmierzone stężenie przekracza 80% wartości poziomu odniesienia (tj. 240 Bq/m³), należy dostosować metodę pomiarową tak, aby wyznaczona niepewność rozszerzona (k = 2) nie przekraczała 30% wartości mierzonej.

Przykład

- **240±70 Bq/m³** precyzja zadowalająca (niepewność <30% z 240 Bq/m³)
- **240±100 Bq/m³** precyzja niezadowalająca (niepewność >30% z 240 Bq/m³)

Sprawozdanie może zawierać informacje dodatkowe, np. zalecenie prowadzenia dalszych działań, informacje o terminie następnego pomiaru, wskazanie środków obniżających stężenie radonu.

4.2. Szczegółowe zalecenia dotyczące miejsc pomiarów i liczby detektorów

Zgodnie z zapisami ustawy Prawo atomowe (art. 23c) „kierownicy jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy:

- 1) zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie

budynków może przekroczyć poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b,

- 2) pod ziemią,
- 3) związane z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b
 - zapewniają w tych miejscach pracy pomiar stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyciowych produktów rozpadu radonu”.

Aby liczba detektorów i pomiarów była optymalna oraz uwzględniając zasady ochrony radiologicznej, sugeruje się wykonywanie pomiarów w pomieszczeniach pracy, w których łączny czas przebywania pracowników wynosi co najmniej 2 h w ciągu doby zgodnie z definicją zawartą w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 25 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (DzU z 2003 r., nr 169, poz. 1650).

W większości typów budynków najwyższe stężenie radonu obserwuje się w okresie jesienno-zimowym i dlatego sugeruje się wykonywanie pomiarów trwających co najmniej 3 miesiące w okresie od 15 września do 15 kwietnia. Jednak ustawa Prawo atomowe dopuszcza wykonywanie trwających co najmniej miesiąc pomiarów w dowolnym okresie roku. Wynik takiego pomiaru wskazuje lub nie wskazuje na możliwość przekroczenia poziomu odniesienia dla średniorocznego stężenia radonu. Aby wyznaczyć wartości średniorocznego stężenia radonu, trzeba przeprowadzić pomiar 12-miesięczny.

W czasie pomiaru detektory należy umieszczać:

- co najmniej 20 cm od ściany,
- w strefie oddychania (na wysokości 1–2 m od podłogi),

- w miejscach zapewniających swobodny przepływ powietrza wokół detektorów,
- w miejscach niedostępnych dla dzieci i zwierząt.

Nie wolno umieszczać detektorów:

- przy drzwiach i oknach (zalecana odległość min. 2 m),
- przy nawiewach grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych,
- w zamkniętych szafach, szafkach i szufladach,
- w studzienkach kanalizacyjnych, przeciwdeszczowych i w zagłębieniach,
- w miejscach silnie nasłonecznionych,
- przy kominkach, piecach i kaloryferach (zalecana odległość min. 2 m),
- przy sprzęcie zasilanym elektrycznie (np. telewizory, radia, głośniki, transformatory),
- w kuchniach, pralniach i łazienkach – jeśli to możliwe (miejsca o dużej wilgotności).

W tabeli 4 zestawiono szczegółowe wskazówki dotyczące prowadzenia pomiarów stężenia radonu za pomocą detektorów pasywnych w różnych rodzajach budynków oraz w różnych miejscach pracy. Zapis „2 h/d” oznacza 2 godziny na dobę.

Tabela 4. Wskazówki dotyczące prowadzenia pomiarów stężenia radonu za pomocą detektorów pasywnych w różnych rodzajach budynków oraz w różnych miejscach pracy

Rodzaj pomieszczenia/budynku / / miejsca pracy	Minimalna liczba detektorów	Przykład pomieszczenia oraz uwagi
Budynki mieszkalne		
wolnostojące, jedno-rodzinne		
pokoje na parterze	1 detektor w pomieszczeniu	salon, sypialnia, gabinet
pokoje na wyższych piętrach	zależnie od układu budynku – konieczna konsultacja	
piwnice, przyziemia, sutereny	1 detektor w pomieszczeniu	piwnice, składy, węzły ciepłownicze, garaże
wielorodzinne		
mieszkania na parterze	1 detektor w pomieszczeniu	salon, sypialnia, gabinet
mieszkania na wyższych piętrach	zależnie od układu budynku – konieczna konsultacja	
Budynki z gruntowymi wymiennikami ciepła (GWC)		
budynki mieszkalne, budynki użyteczności publicznej, miejsca pracy	1 detektor w pomieszczeniach z wlotem systemu GWC	pomiar metodą aktywną przy wlocie systemu GWC w trakcie działania systemu i przy wyłączonym systemie – pomiar min. 2–3 h w pokojach ≤30 m ² , min. 3–6 h w pomieszczeniach >30 m ²
	1 detektor w pomieszczeniach na parterze	
	1 detektor w węźle GWC	

Tabela 4. Wskazówki dotyczące prowadzenia pomiarów stężenia radonu za pomocą detektorów pasywnych w różnych rodzajach budynków oraz w różnych miejscach pracy – cd.

Rodzaj pomieszczenia/budynku / / miejsca pracy	Minimalna liczba detektorów	Przykład pomieszczenia oraz uwagi
Miejsca pracy		
budynki użyteczności publicznej		
żłobki, przedszkola	1 detektor w każdej sali / każdym pokoju na parterze, w której/ /którym dzieci i/lub pracownicy przebywają >2 h/d	sale zajęciowe w żłobkach i przedszkolach, pokoje personelu
budynki szkolne	1 detektor w każdej klasie/sali, pracowni na parterze 1 detektor w pokojach dla personelu na parterze i w piwnicy, w których pracownicy przebywają >2 h/d	klasy, pracownie, sale wykładowe, laboratoria, pokój nauczycielski, pokoje personelu, portiernie
internaty	1 detektor w każdej sypialni i pracowni na parterze i w piwnicy 1 detektor w pomieszczeniach dla personelu, w których personel/obsługa przebywa >2 h/d	sypialnie, pokoje pracy, pokoje personelu, portiernie
uczelnie	1 detektor w salach wykładowych na parterze i w piwnicy, w laboratoriach, pokojach, w których pracownicy/studenci przebywają >2 h/d	sale wykładowe, laboratoria, pokoje pracowników, portiernie

Rodzaj pomieszczenia/budynku / / miejsca pracy	Minimalna liczba detektorów	Przykład pomieszczenia oraz uwagi
inne miejsca pracy		
pomieszczenia o powierzchni <150 m ²	1 detektor w każdym pomieszczeniu na parterze i w piwnicy, w którym pracownicy/ /studenci przebywają >2 h/d	małe biura, małe sklepy, warsztaty, małe banki, gabinety lekarskie, pensjonaty, małe hotele itp.
pomieszczenia o powierzchni 150–999 m ²	1 detektor na 150 m ² w pomieszczeniach, w których pracownicy przebywają >2 h/d	kina, teatry, hotele, centra administracyjne, hale sklepowe, hale warsztatowe, muzea, magazyny, sale wystawowe, biblioteki, duże powierzchnie biurowe itp.
pomieszczenia o powierzchni 1000–5000 m ²	1 detektor na 500 m ² w pomieszczeniach, w których pracownicy przebywają >2 h/d detektor w pobliżu gablot z eksponatami, np. próbkami geologicznymi (możliwe wysokie stężenia radonu!)	sklepy wielkopowierzchniowe, muzea, sale wystawowe, biblioteki, magazyny itp.
pomieszczenia o powierzchni >5000 m ²	1 detektor na każdy odrębny obszar o różnych warunkach środowiskowych nie mniej niż 1 detektor na 1000 m ²	sklepy wielkopowierzchniowe, centra administracyjne, magazyny, hale produkcyjne

Tabela 4. Wskazówki dotyczące prowadzenia pomiarów stężenia radonu za pomocą detektorów pasywnych w różnych rodzajach budynków oraz w różnych miejscach pracy – cd.

Rodzaj pomieszczenia/budynku / / miejsca pracy	Minimalna liczba detektorów	Przykład pomieszczenia oraz uwagi
Specyficzne miejsca pracy		
podziemne zakłady górnicze (kopalnie)		specyfikę wykonywania pomiarów przedstawiono w Aneksie 2
podziemne trasy turystyczne (jaskinie, kopalnie, pomilitarne instalacje podziemne, np. schrony, piwnice, pozostałe)		specyfikę wykonywania pomiarów przedstawiono w Aneksie 3
miejsca wydobywania ropy lub gazu ziemnego	detektor na wysokości 1–2 m, w odległości co najmniej 20 cm od ściany	wiertnie – rozdzielnie, maszynownie, warsztaty miejsca pracy obsługi wiertni i pracowników utrzymania ruchu tłocznie, magazyny techniczne, warsztaty, laboratoria płuczkowe, badawcze, rdzeniownie i inne zlokalizowane w odległości do 100 m od wieży wiertniczej
stacje uzdatniania wody	1 detektor na 150 m ² detektor na wysokości 1–2 m, w odległości co najmniej 20 cm od ściany	stacje filtrów, aeratory, sprężarki, hydrofornie, pomieszczenia, w których znajdują się zbiorniki (zwłaszcza otwarte)

Rodzaj pomieszczenia/budynku / / miejsca pracy	Minimalna liczba detektorów	Przykład pomieszczenia oraz uwagi
jaskinie i inne naturalne pustki w górotworze	pomiar zawsze przed rozpoczęciem pracy speleologów, klimatologów, biologów i innych pracowników nauki na nowych stanowiskach pracy w miejscu zapewniającym swobodny obieg powietrza	miejsca pracy speleologów, klimatologów, biologów i innych pracowników nauki
spa podziemne, sanatoria radonowe	1 detektor na 150 m ² detektor na wysokości 1–2 m, w odległości co najmniej 20 cm od ściany	miejsca pracy, w których wykonywane są zabiegi, budynki biurowe, sklepy z pamiątkami
podziemne parkingi, przestrzenie handlowe, tunele, magazyny, stacje metra itp.	1 detektor na 150 m ² detektor na wysokości 1–2 m, w odległości co najmniej 20 cm od ściany	magazyny, tunele, studzienki rewizyjne, pomieszczenia techniczne
parki wodne, baseny	1 detektor na 150 m ² detektor na wysokości 1–2 m, w odległości co najmniej 20 cm od ściany	baseny w pomieszczeniach zamkniętych

5. Dawki od radonu w miejscach pracy

5.1. Metodyka obliczenia dawki

Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (DzU z 2021 r., poz. 1657) dawkę skuteczną (efektywną) w przypadku narażenia na radon i jego pochodne wyznacza się przez pomiar lub obliczenie stężenia energii potencjalnej promieniowania α (C_α) produktów rozpadu radonu, tj. całkowitej energii α wyemitowanej ostatecznie podczas rozpadu pochodnych radonu w łańcuchu rozpadu aż do izotopu ^{210}Pb (z wyłączeniem tego izotopu).

Wartość dawki skutecznej E (Sv) wylicza się, korzystając ze wzoru:

$$E = k_f \cdot C_\alpha \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

C_α – stężenie energii potencjalnej promieniowania α produktów rozpadu radonu (J/m^3),

t – czas narażenia na radon (h),

k_f – współczynnik konwersji wynoszący (wg ICRP 65) $1,1 \text{ Sv}/(\text{J} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ dla radonu w domu mieszkalnym i $1,4 \text{ Sv}/(\text{J} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ dla radonu w miejscu pracy.

W celu przejścia z wartości stężenia radonu C_{Rn} (Bq/m^3) do wartości stężenia energii potencjalnej promieniowania α produktów rozpadu radonu C_α (J/m^3) stosuje się wzór:

$$C_\alpha = 5,57 \cdot 10^{-9} [\text{J} \cdot \text{s}] \cdot C_{\text{Rn}} \cdot F \quad (2)$$

gdzie:

F – współczynnik równowagi (-).

Współczynnik równowagi F to iloraz stężenia równowaznego radonu C_{eq} i aktualnego stężenia aktywności radonu C_{Rn} . W obliczeniach dawki skutecznej przyjmuje się jego stałą wartość w domach mieszkalnych i w miejscach pracy wynoszącą 0,4.

Ostateczny wzór na wartość dawki skutecznej E (Sv) na podstawie pomiaru stężenia aktywności radonu C_{Rn} (Bq/m^3) przyjmuje więc postać:

$$E = 5,57 \cdot 10^{-9} [\text{J} \cdot \text{s}] \cdot C_{\text{Rn}} \cdot F \cdot k_f \cdot t \quad (3)$$

W celu obliczenia rocznej dawki skutecznej od narażenia na radon i jego pochodne do wzoru (3) w miejsce wartości stężenia radonu (Bq/m^3) należy wstawić wartość średniorocznego stężenia aktywności radonu powiększoną o odpowiadającą jej wartość niepewność.

Przykład

Jaką roczną dawkę skuteczną otrzyma pracownik w wyniku narażenia na radon w miejscu pracy, w którym spędza standardowe 2000 h/rok, a średnioroczne stężenie radonu wynosi $270 \pm 30 \text{ Bq}/\text{m}^3$ (wartość stężenia radonu, która zostanie wykorzystana do obliczeń, jest równa wartości poziomu odniesienia, tj. $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

Dane:

- czas narażenia $t = 2000 \text{ h}$
- średnioroczne stężenie radonu $= 270 \text{ Bq}/\text{m}^3$
- niepewność wyniku $= 30 \text{ Bq}/\text{m}^3$
- średnioroczne stężenie radonu + niepewność wyniku $= 270 + 30 = 300 \text{ Bq}/\text{m}^3$
- współczynnik równowagi $F (-) = 0,4$
- współczynnik konwersji $k_f = 1,4 \text{ Sv}/(\text{J} \cdot \text{h}/\text{m}^3)$ – dla radonu w miejscu pracy,

czyli:

$$E = 5,57 \cdot 10^{-9} [\text{J} \cdot \text{s}] \cdot 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,4 \cdot 1,4 \left[\frac{\text{Sv}}{\text{J} \cdot \frac{\text{h}}{\text{m}^3}} \right] \cdot 2000 [\text{h}]$$
$$E = 0,0019 [\text{Sv}] = 1,9 [\text{mSv}]$$

Szczegółowe przeliczenia umożliwiające wyrażenie stężenia energii potencjalnej promieniowania α produktów rozpadu radonu C_α (J/m^3) za pomocą wartości stężenia radonu C_{Rn} (Bq/m^3) przedstawiono w Aneksie 4.

Uwaga

W 2017 r. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (International Commission on Radiological Protection – ICRP) zarekomendowała nowe, wyższe wartości współczynników konwersji dawki:

- miejsca pracy wewnątrz pomieszczeń: $5,7 \text{ mSv}/\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$
($1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}/\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$),
- kopalnie: $3,3 \text{ mSv}/\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ (-),
- podziemne trasy turystyczne: $6,7 \text{ mSv}/\text{mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$
($1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}/\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$).

Większość krajów Unii Europejskiej wprowadziła już (stan na 2025 r.) rekomendacje ICRP do swoich regulacji prawnych. Zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej Polska również jest zobowiązana do wdrożenia tych zaleceń.

5.2. Kwalifikacja pracowników do kategorii narażenia na promieniowanie jonizujące

Zgodnie z artykułem 23c ust. 3 ustawy Prawo atomowe w przypadku miejsc pracy zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub w piwnicy na terenach wymienionych w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia (DzU z 2020 r., poz. 1139) kierownik jednostki jest zobowiązany podjąć działania zapewniające ograniczenie narażenia na radon, jeśli jego stężenie przekroczy poziom odniesienia.

Zgodnie z artykułem 23c ust. 4 ustawy Prawo atomowe, jeśli w miejscach pracy zlokalizowanych pod ziemią lub w punktach związanych z uzdatnianiem wód podziemnych znajdujących się na terenach wymienionych w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia (DzU z 2020 r., poz. 1139) narażenie pracowników na otrzymanie dawki skutecznej od radonu wynosi $>1 \text{ mSv}/\text{rok}$, kierownik jednostki jest zobowiązany podjąć odpowiednie działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon.

Jeśli pomimo podjęcia działań zapobiegawczych nie uda się obniżyć stężenia radonu poniżej poziomu odniesienia (dla miejsc pracy wewnątrz pomieszczeń zlokalizowanych na parterze lub w piwnicy) lub dawki skutecznej od radonu $<1 \text{ mSv}/\text{rok}$ (dla miejsc pracy zlokalizowanych pod ziemią lub związanych z uzdatnianiem wód podziemnych), pracownik powinien zostać zakwalifikowany do jednej z 2 kategorii narażenia: A lub B. Pracownik narażony na otrzymanie dawki skutecznej $>6 \text{ mSv}/\text{rok}$ musi zostać zakwalifikowany do kategorii A, a dawki $\leq 6 \text{ mSv}/\text{rok}$ – do kategorii B.

Pracownicy kategorii A są objęci indywidualnym monitoringiem dozymetrycznym. Miejsce pracy, w którym możliwe

jest otrzymanie dawki skutecznej kwalifikującej do kategorii A, jest wydzielone i oznaczone jako teren kontrolowany.

Pracownicy kategorii B są objęci monitoringiem dozymetrycznym środowiskowym w miejscu wykonywanej pracy. Kierownik jednostki może jednak objąć ich także stałym monitoringiem indywidualnym. Miejsce pracy, w którym możliwe jest otrzymanie dawki skutecznej kwalifikującej do kategorii B i które nie zostało zakwalifikowane do terenów kontrolowanych, zostaje wydzielone i oznaczone jako teren nadzorowany.

6. Zalecane działania w przypadku zarejestrowania stężenia radonu $>300 \text{ Bq/m}^3$

Postępowanie w przypadku przekroczenia poziomu odniesienia (300 Bq/m^3) w miejscu pracy:

- obliczenie rocznej dawki efektywnej dla pracowników na podstawie czasu pracy wskazanego przez kierownika jednostki organizacyjnej; jeśli dawka efektywna jest w zakresie:
 - $<1 \text{ mSv/rok}$ – podejmowanie działania nie jest konieczne,
 - $1\text{--}6 \text{ mSv/rok}$ – należy przypisać pracownika do kategorii B,
 - $>6 \text{ mSv/rok}$ – należy przypisać pracownika do kategorii A;
- pisemne poinformowanie pracowników o zwiększonym narażeniu na radon, wynikach pomiarów stężenia radonu w miejscu pracy, otrzymanych przez nich dawkach promieniowania oraz działaniach podejmowanych w celu ograniczenia narażenia na radon w miejscu pracy (zgodnie z art. 23c ust. 2 ustawy Prawo atomowe);

- zalecenie wizji lokalnej z przyrządem aktywnym w celu identyfikacji dróg wnikania radonu do budynku;
- podjęcie działań mających na celu obniżenie stężenia radonu w budynku (np. uszczelnienie fundamentów, zwiększenie wentylacji, instalacja dodatkowej wentylacji, ograniczenie czasu pracy w danym pomieszczeniu);
- wykonanie pomiarów kontrolnych.

Postępowanie w przypadku przekroczenia poziomu odniesienia (300 Bq/m^3) w budynku mieszkalnym:

- podjęcie działań mających na celu obniżenie stężenia radonu w budynku, a po ich przeprowadzeniu – wykonanie pomiarów kontrolnych (zalecany jest dłuższy czas ekspozycji detektora, np. 3–12 miesięcy);
- zalecenie wizji lokalnej z przyrządem aktywnym w celu identyfikacji dróg wnikania radonu do budynku;
- uszczelnienie zidentyfikowanych/możliwych dróg wnikania radonu do budynku oraz optymalizacja działania wentylacji grawitacyjnej.

Postępowanie w przypadku uzyskania rozbieżnych stężeń radonu w budynku (w jednym pomieszczeniu $<300 \text{ Bq/m}^3$, a w drugim np. $>600 \text{ Bq/m}^3$):

- ponieważ rozbieżności zdarzają się stosunkowo często, należy wykonywać pomiary w każdym pomieszczeniu, w którym pracownicy przebywają $>2 \text{ h/d}$;
- przeprowadzenie wizji lokalnej;
- przeprowadzenie pomiarów przyrządem aktywnym w celu identyfikacji dróg wnikania radonu do budynku;
- podjęcie działań mających na celu obniżenie stężenia radonu w pomieszczeniu/budynku, a po ich przeprowadzeniu – wykonanie pomiarów kontrolnych.



Rycina 5. Schemat działań podejmowanych w zależności od stężenia radonu

Postępowanie w zależności od wyniku stężenia radonu przedstawiono na rycinie 5.

Należy zaznaczyć, że miarą narażenia na promieniowanie jonizujące jest dawka skuteczna, która zależy od współczynników konwersji, stężenia radonu w powietrzu i czasu narażenia.

Kiedy stężenie radonu jest wysokie, ale czas pracy w danym pomieszczeniu krótki, pracownik otrzyma mniejszą dawkę skuteczną niż w sytuacji odwrotnej, gdy stężenie jest niższe, ale czas przebywania w pomieszczeniu dłuższy. Na przykład dawka skuteczna dla pracownika przebywającego przez 50 h/rok w pomieszczeniu, w którym stężenie radonu wynosi 600 Bq/m³, to 0,09 mSv, a dla pracownika przebywa-

jącego przez 1000 h/rok w pomieszczeniu, w którym stężenie radonu wynosi 400 Bq/m³, to 1,25 mSv.

Warto podkreślić, że detektory śladowe ekspozycyjne w miejscu pracy rejestrują stężenie radonu także poza godzinami pracy pracowników, tj. w nocy i w weekendy, gdy stężenie jest wyższe (z powodu np. zamknięcia drzwi i okien, wyłączenia klimatyzacji).

Uwaga

Z punktu widzenia określenia narażenia pracownika wynik pomiaru może być zawyżony w stosunku do stężenia radonu, na które narażony jest pracownik w czasie przebywania w miejscu pracy. Przed decyzją o podjęciu działań ograniczających narażenie sugeruje się konsultację uzyskanych wyników z ekspertami, np. z Polskiego Centrum Radonowego (PCRn). Istnieją metody wyznaczania współczynnika korygującego uzyskany wynik długoterminowego pomiaru tylko dla stężenia radonu występującego w godzinach pracy pracowników.

W rekomendacjach zawartych w „ICRP statement on radon” z 2009 r. ICRP zaleca stężenie radonu 1000 Bq/m³ jako wartość graniczną dla zastosowania wymogów ochrony radiologicznej w miejscu pracy w sytuacji narażenia.

Na podstawie tych rekomendacji PCRn sugeruje przyjęcie wartości średniorocznego stężenia radonu 1000 Bq/m³ jako tzw. poziomu działania (*action level*) dla radonu w miejscu pracy. Jest to podejście zgodne także z zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (wg International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 33). Odpowia-

da otrzymaniu przez pracownika dawki skutecznej ok. 6 mSv przy założeniu czasu pracy 2000 h/rok i współczynnika równowagi między radonem i jego pochodnymi 0,4. Ta wartość poziomu działania dla radonu mieści się w połowie zakresu (500–1500 Bq/m³) zalecanego przez ICRP w ICRP 65.

Jest to jednak tylko zalecenie: obowiązujące w styczniu 2026 r. przepisy prawa nie obligują do takiego działania.

LABORATORIA POSIADAJĄCE AKREDYTACJĘ POLSKIEGO CENTRUM AKREDYTACJI (PCA) W ZAKRESIE POMIARÓW STĘŻENIA RADONU W BUDYNKACH

(stan na marzec 2026 r.)

- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Warszawa (nr akredytacji AB 450)
- Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, Katowice (nr akredytacji AB 005)
- Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Kraków (nr akredytacji AB 788)
- Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr med. Jerzego Nofera, Łódź (nr akredytacji AB 327)
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock (nr akredytacji AB 567)

INSTYTUCJE TWORZĄCE SIEĆ NAUKOWĄ

POLSKIE CENTRUM RADONOWE (PCRN)

(stan na marzec 2026 r.)

Polskie Centrum Radonowe jest siecią naukową, którą tworzą krajowe instytucje prowadzące badania naukowe dotyczące problematyki radonowej. Instytucje wchodzące w skład PCRN zachowują pełną niezależność swojej działalności, a w zadaniach związanych z celami PCRN deklarują chęć współpracy.

Polskie Centrum Radonowe tworzą:

- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (Warszawa)
- Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy (Katowice)
- Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (Kraków)
- Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr med. Jerzego Nofera (Łódź)
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych (Otwock)
- Politechnika Łódzka (Łódź)
- Politechnika Wrocławska (Wrocław)
- Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego (Warszawa)
- Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego (Kalisz)
- Uniwersytet Opolski (Opole)
- Uniwersytet Śląski (Katowice)
- Uniwersytet Wrocławski (Wrocław)
- Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (Różan)

ŹRÓDŁA DANYCH

1. Bonczyk M, Chałupnik S, Wysocka M, Grygier A, Hildebrandt R, Tosheva Z, et al. The determination of radon/thoron exhalation rate in an underground coal mine – preliminary results. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(10):6038.
2. Bulewicz K, Olszewski J, Domienik-Andrzejewska J. Analiza wyników komercyjnych pomiarów radonu w latach 2022–2023. *Med Pr Work Health Saf*. 2025;76(1):1–10. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01591>.
3. Cinelli G, De Cort M, Tollefsen T, red. European atlas of natural radiation. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2019.
4. Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 2005;330(7485):223. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>.
5. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska; Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Atlas radiologiczny Polski 2011. Warszawa: GIOŚ, CLOR; 2012.
6. Grygier A, Skubacz K, Wysocka M, Bonczyk M, Piech A, Janik M. Radon exposure in the underground tourist route – Historic Silver Mine in Tarnowskie Góry, Poland. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(23):15778.
7. Health Canada. Guide for radon measurements in residential dwellings (homes). Ottawa: Health Canada; 2017.
8. Health Canada. Radon guide for measurements in public buildings, workplaces, schools, day cares, hospitals, care facilities and correctional centres. Ottawa: Health Canada; 2021.
9. Industrial Radon Measurement Association. Industrial radon measurement guideline to get an overall view of the radon concentration in a workplace. Vienna: IRMA; 2017 (IRMA 0791-30).
10. International Atomic Energy Agency. National and regional surveys of radon concentration in dwellings: review of methodology and measurement techniques. IAEA: Vienna; 2013.

11. International Atomic Energy Agency. National and regional surveys of radon concentration in dwellings: review of methodology and measurement techniques. Analytical quality in nuclear applications series No. IAEA/AQ/33. Vienna: IAEA; 2013.
12. International Atomic Energy Agency. Nuclear data. Vienna: IAEA. <https://www-nds.iaea.org>.
13. International Atomic Energy Agency. Radiation protection against radon in workplaces other than mines. Safety Reports Series No. 33. Vienna: IAEA; 2003.
14. International Commission on Radiological Protection. Protection against Radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann ICRP. 1993;23(2).
15. International Commission on Radiological Protection Statement on radon. Annals of the ICRP. 2009;39(1). Ref 00/902/09.
16. International Laboratory Accreditation Cooperation. Wytyczne dotyczące zasad podejmowania decyzji i stwierdzeń zgodności (ILAC-G8:09/2019). Silverwater: ILAC; 2019.
17. International Organization for Standardization. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva: ISO; 1993. Polish edition: Wyrażanie niepewności pomiaru – poradnik. Warszawa: Główny Urząd Miar; 1999.
18. Kochański JW. Balneologia i hydroterapia. Wrocław: Akademia Wychowania Fizycznego we Wrocławiu; 2002.
19. Kozak K, Mazur J, Grządziel D. Techniki pomiarów radonu w powietrzu gruntowym i metody wyznaczania indeksu ryzyka radonowego (RI) terenu pod zabudowę. W: Zmyślony M, Nowosielska EM, red. Aktualny stan prawny ochrony przed promieniowaniem jonizującym i polami elektromagnetycznymi 0–300 GHz w Polsce. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna; 2021. s. 345–55.
20. Kozak K, Mazur J, Kozłowska B, Karpińska M, Przylibski TA, Mamont-Cieśla K, et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Appl Radiat Isot. 2011;69:1459–65.
21. Musiałowicz T. Encyklopedyczny słownik angielskich terminów i definicji z dziedziny ochrony radiologicznej oraz ich odpowiedniki przyjęte w Polsce. Wyd. 2. Warszawa: Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej; 2005.
22. Nazaroff WW, Nero AV. Radon and its decay products in indoor air. New York: John Wiley & Sons; 1988.
23. Norenberg M, Mazur J, Wołoszczuk K, Kozak K, Grządziel D. Gdzie szukać informacji o radonie? Regulacje prawne i opracowania dotyczące problematyki radonowej. Bezp Jądrowe Ochr Radiol. 2022;3(125):1–10.
24. Przylibski TA. Radon. Składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2005.
25. Radiation and Nuclear Safety Authority. Regulation on practices that cause exposure to natural radiation. Regulation STUK S/6/2022. Helsinki: STUK; 2022.
26. Radiological Protection Institute of Ireland. RPII protocol for the measurement of radon in homes. Dublin: Radiological Protection Institute of Ireland; 2010.
27. Radon Offices of Austria, Switzerland, Southern Germany and South Tyrol. Information about radon: precautions for new buildings, measurement and evaluation, mitigation measures in existing buildings, the effect of retrofitting thermal insulation. Bolzano/Bozen: Radon Offices; 2010.
28. Raport Roczny 2024. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2024 r. Warszawa: Państwowa Agencja Atomistyki; 2025.
29. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 25 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. DzU z 2003 r., nr 169, poz. 1650.
30. Szczepanik-Scislo N, Grządziel D, Mazur J, Kozak K, Schnotale J. Influence of human activity on radon concentration, indoor air quality, and thermal comfort in small office spaces. Sensors. 2024;24:4949. <https://doi.org/10.3390/s24154949>.

31. UK Health Security Agency. Radon in the workplace. Chilton: UKRadon; 2020.
32. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2019 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex B: Lung cancer from exposure to radon. New York: United Nations; 2020.
33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with annexes. New York: United Nations; 1988.
34. United States Environmental Protection Agency. Indoor radon and radon decay product measurement device protocols. Washington (DC): U.S. Environmental Protection Agency; 1992.
35. World Health Organization. WHO Handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO; 2009.
36. Wysocka M, Bonczyk M, Skubacz K, Chmielewska I, Samolej K, Chałupnik S. Zagrożenie radiacyjne. W: Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego 2021. Katowice: Główny Instytut Górnictwa; 2022.
37. Wysocka M, Chałupnik S, Nowak S, Bonczyk M. Radon concentrations in dwellings in the mining area – are there observed effects of the coal mine closure? *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(9):5214.
38. Wysocka M, Skubacz K, Michalik B, Chałupnik S, Skowronek J, Bonczyk M, et al. The system of monitoring and controlling natural radiation hazards in Polish coal mines. *Int J Min Miner Eng*. 2021;12(3):229–39.

Stężenie radonu w budynkach

Czynniki wpływające na stężenie radonu w budynkach

Stężenie radonu w budynkach jest wypadkową wielu czynników, które w dużym uproszczeniu można podzielić na 3 grupy:

- 1) geologiczne,
- 2) związane z warunkami atmosferycznymi,
- 3) związane z konstrukcją budynku.

Człowiek ma wpływ tylko na tę ostatnią grupę i to, w połączeniu z wiedzą na temat wpływu pozostałych 2 czynników, może zwiększyć ochronę populacji przed narażeniem na radon.

Radon powstaje w wyniku rozpadu izotopu radu (^{226}Ra). Im większe jego stężenie w glebie, tym większe prawdopodobieństwo, że stężenie w budynkach będzie wyższe. Rad należy do pierwiastków naturalnych; jego długi okres półrozpadu (ok. 1600 lat) powoduje, że może stanowić stałe źródło radonu. Rozkład stężenia radu w powierzchniowej warstwie gleby w Polsce przedstawiono na rycinie 1.

Wysokie stężenie radonu w glebie może, ale nie musi, być przyczyną jego wysokiego stężenia w budynkach. Zależy ono od emanacji, transportu i ekshalacji, czyli 3 etapów jego uwalniania się ze skorupy ziemskiej.

Emanacja to proces uwalniania się atomów radonu z ziaren gleby lub skał do przestrzeni międzyziarnowej. W zależności od umiejscowienia atomu radu w ziarnie mineralnym nowo powstały atom radonu może pozostać w ziarnie, przedostać się do sąsiedniego ziarna, zostać stłumiony przez wodę znajdującą się pomiędzy ziarnami lub wydostać się do przestrzeni między-



Rycina 1. Rozkład stężenia radu (^{226}Ra) w powierzchniowej warstwie gleby w Polsce [źródło: „Atlas radiologiczny Polski 2011”, 2012]

ziarnowej. Większość atomów radonu wytwarzanych w ziarnie mineralnym pozostaje w nim. Szacuje się, że 10–50% atomów uwalnia się do przestrzeni międzyziarnowej, skąd są transportowane poprzez szczeliny, pęknięcia i spękania na powierzchnię ziemi.

Transport zależy od przepuszczalności gleby. Bardzo zwarte gleby (np. gliny) stanowią dla radonu barierę trudną do pokonania. Jeśli w podłożu obecne są pęknięcia lub szczeliny albo gdy podłoże tworzą gleby przepuszczalne (np. piaski lub żwiry), występuje swobodny transport radonu na powierzchnię. Domy zbudowane na zboczach (zwiększona powierzchnia kontaktu z gruntem) i zwietrzałym granicie, na obszarach zja-

wisk krasowych lub glebach żwirowych są w większym stopniu narażone na wyższe stężenia radonu.

Wydostawanie się radonu z gruntu (ekshalacja) jest ostatnim etapem jego uwalniania się ze skorupy ziemskiej. Ekshalacja zależy w dużym stopniu od wilgotności i temperatury gleby oraz od czynników atmosferycznych, takich jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura, prędkość wiatru i opady. Duża zawartość wody w glebie stanowi swoistą izolację i skutecznie utrudnia ten proces. Radon wydostający się z gruntu do powietrza jest rozrzedzany do niskich stężeń, przy czym stopień rozrzedzenia zależy od stabilności atmosfery oraz obecności wiatru i poziomu turbulencji.

Radon może przenikać do wnętrza budynku poprzez pęknięcia i szczeliny w fundamentach oraz wzdłuż przepustów instalacji. Jest zasysany także przez strefę depresji, która rozwija się wewnątrz obiektu (tzw. efekt kominowy powstający w wyniku różnicy temperatur wewnątrz i na zewnątrz budynku). Wnika do wnętrza budynku także z powodu różnicy ciśnień powstającej np. w wyniku naporu wiatru.

Na rozkład stężenia radonu wewnątrz budynku istotny wpływ mają rozwiązania architektoniczne. Otwarte przestrzenie między piwnicą lub parterem a wyższymi kondygnacjami ułatwiają przemieszczanie się tego gazu do góry. Tempo, w jakim następuje wymiana powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, ma istotny wpływ na stężenie radonu w pomieszczeniu. Naturalne nieszczelności okien i drzwi zwiększają szybkość wymiany powietrza, a w przypadku jej ograniczenia, np. po zamontowaniu szczelnych okien i drzwi, stężenie tego gazu wewnątrz może znacznie wzrosnąć.

Zdecydowanie mniejszy wpływ na stężenie radonu w budynku mają zastosowane materiały budowlane oraz zawartość radonu w wodzie. W niewielu budynkach przyczyną wysokiego

stężenia tego gazu jest radon rozpuszczony w wodzie. Są jednak miejsca, w których to źródło ma znaczenie (np. uzdrowiska termalne, niektóre budynki w Sudetach). Podobnie jest w przypadku radonu wydostającego się z materiałów budowlanych: w większości przypadków nie mają one znaczącego wpływu na stężenie tego gazu w pomieszczeniach. Zawartość radu w materiałach budowlanych na ogół jest niska – wyjątek stanowią np. betony z łupków ałunowych i materiały budowlane z tufu wulkanicznego, produkty uboczne fosfogipsu oraz niektóre odpady przemysłowe.

Dobowa i sezonowa zmienność stężenia radonu w budynkach

Stężenie radonu w budynkach podlega znacznym wahaniom czasowym. Obserwowane są zmiany stężenia w wymiarze godzinowym, dobowym, tygodniowym i sezonowym. Jest to oczywistą konsekwencją właściwości gazowych radonu, który podlega zjawiskom fizycznym typowym dla tego stanu skupienia.

Na godzinowe zmiany stężenia radonu mają wpływ nawyki i zwyczaje mieszkańców, tj. częstość wietrzenia pomieszczeń, utrzymywanie wysokiej/niskiej temperatury w pomieszczeniach, okresy przebywania w nich.

Zmiany dobowe są związane przede wszystkim z różnicą temperatur pomiędzy wnętrzem budynku a jego otoczeniem. Nocą zazwyczaj temperatura otoczenia spada, co skutkuje zwiększeniem różnicy ciśnień, która odpowiednio zwiększa efekt kominy i szybkość wnikania radonu do budynku.

Zmiany sezonowe również są związane z różnicą temperatur pomiędzy budynkiem a otoczeniem. Najwyższe stężenia radonu w budynkach w skali roku odnotowuje się w okresie jesienno-zimowym, tj. od 15 września do 15 kwietnia (okres grzewczy). Konsekwencją tego są zapisy zawarte w krajowym planie radonowym (Monitor Polski 2021, poz. 169), w którym

zaleca się wykonywanie pomiarów radonu w budynku w tym właśnie czasie. Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że w tych miesiącach wartości stężeń radonu są najwyższe w roku.

Radon uwolniony z wody do powietrza może być źródłem zagrożenia dla pracowników zatrudnionych przy wykorzystaniu wód mineralnych. Wody podziemne, m.in. silnie zmineralizowane i termalne, czyli takie, w których rozpuszczalność gazów jest mniejsza, często zawierają radon w stężeniach przekraczających kilkaset, a nawet 1000 Bq/l. Wody mineralne stosowane w lecznictwie uzdrowiskowym zawierają sole mineralne wypłukiwane z głębszych warstw litosfery oraz rozpuszczalne gazy: dwutlenek węgla i radioaktywny radon.

Wodę zawierającą dużą ilość radonu (tzw. wody radonowe) stosuje się w lecznictwie uzdrowiskowym w kuracji pitnej i w postaci inhalacji. W kilkudziesięciu uzdrowiskach w Polsce wykorzystuje się znaczną ilość wody mineralnej, zwykle w pomieszczeniach zamkniętych, takich jak łazienki, inhalatoria, baseny itp. W takich warunkach może dochodzić do koncentracji radonu w pomieszczeniach, w których przebywają pracownicy. Wysokie stężenie radonu w wodzie może zwiększać narażenie pracowników. Zjawisko to może występować także podczas stosowania wód nieradonowych, czyli o zawartości radonu <74 Bq/l.

W Polsce coraz bardziej popularne jest wykorzystywanie naturalnych wód termalnych do rekreacji. Działających i uruchamianych ośrodków wykorzystujących takie wody (tzw. spa) jest kilkanaście. Zazwyczaj badania wód termalnych i uzdrowiskowych koncentrują się na zawartości mikroelementów i pierwiastków (w tym promieniotwórczych, z uwzględnieniem radu i radonu).

Specyfika wykonywania pomiarów w podziemnych zakładach górniczych (kopalniach)

Radon jest stosunkowo słabo radiotoksyczny, ponieważ jako gaz szlachetny jest łatwo usuwany z organizmu drogą oddechową. Dużo bardziej radiotoksyczne są nuklidy promieniotwórcze, które powstają z radonu w wyniku rozpadów promieniotwórczych: izotopy polonu, bizmutu i ołowiu. Produktami rozpadu radonu są: ^{218}Po , ^{214}Bi , ^{214}Pb oraz ^{214}Po , które są izotopami pierwiastków będących metalami ciężkimi. Powstają jako cząstki naładowane elektrycznie i w powietrzu szybko łączą się z aerozolami oraz pyłami, tworząc tzw. aerozole promieniotwórcze. Są deponowane w drogach oddechowych. Z powodu krótkiego czasu połowicznego rozpadu ($T_{1/2}$), dla produktów rozpadu radonu <30 min, całkowita energia wynikająca z ich rozpadu jest przekazywana bezpośrednio tkankom organów, w których zostały zdeponowane. Nuklidy, zwane krótkożyciowymi produktami rozpadu radonu, stanowią najważniejsze źródło narażenia radiacyjnego dla przeciętnego człowieka.

Produktami rozpadu izotopu ^{220}Rn (toronu) są izotopy: ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po i ^{208}Tl . Ze względu na krótki $T_{1/2}$ toronu (55 s) jego ekshalacja jest znacznie mniejsza niż w przypadku radonu i mimo że jego produkty rozpadu zachowują się w powietrzu podobnie jak produkty rozpadu radonu, obecnie zakłada się, że ich obecność w atmosferze w podziemnych zakładach górniczych nie wnosi istotnego wkładu do całkowitego narażenia. Dlatego toron nie jest obecnie uwzględniany w pomiarach i ocenie narażenia radiacyjnego.

W wyrobiskach górniczych kopalń podziemnych stężenie radonu i krótkożyciowych produktów jego rozpadu bywa większe niż w innych miejscach, ponieważ wyrobisko jest przestrzenią otoczoną zazwyczaj mocno spękanymi skałami, z ograniczoną wentylacją. W kopalniach węgla na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) stężenie wynosiło 15 000 Bq/m³, a w kopalniach dolnośląskich – nawet 150 000 Bq/m³.

Zagrożenie krótkożyciowymi produktami rozpadu radonu nie jest takie samo we wszystkich kopalniach – nie jest nawet identyczne na terenie jednej kopalni. Poziomy stężenie radonu w atmosferze kopalnianej zależą przede wszystkim od intensywności przewietrzania wyrobisk oraz od sposobu eksploatacji złoża. W wyrobiskach, w których występuje zagrożenie gazowe, stosuje się intensywną wentylację, więc stężenie pochodnych radonu jest niskie. Niskie stężenia radonu występują także w wyrobiskach, w których buduje się podsadzkę, ponieważ utrudnia ona wydostawanie się radonu do obecnego w nich powietrza. Z kolei wysokie stężenia radonu występują w nieczynnych wyrobiskach, zrobach, drażonych chodnikach i w powietrzu wylotowym z eksploatowanych ścian. Gdyby produkty rozpadu radonu nie były usuwane z powietrza w wyniku osiadania na ociosach, opadania pyłów na spąg oraz przewietrzania wyrobisk, to po pewnym czasie ich aktywność osiągnęłyby aktywność radonu, dochodząc do tzw. stanu wiekowej równowagi promieniotwórczej. W rzeczywistości, niezależnie od usuwania pochodnych radonu z powietrza, im starsze jest powietrze obiegowe, tym więcej zawiera produktów rozpadu radonu. Dlatego im dłuższa jest droga przepływu powietrza i mniejsza jego prędkość, tym więcej może się w nim znajdować aerozoli promieniotwórczych.

W praktyce rzadko mierzy się stężenia poszczególnych pochodnych radonu; zazwyczaj operuje się pojęciem stężenia

energii potencjalnej promieniowania α (C_α) pochodnych radonu. Mierzona jest w dżulach na metr sześcienny (J/m³) i wyraża całkowitą energię, jaką w postaci promieniowania α uwolniłyby produkty rozpadu radonu zawarte w jednostce objętości powietrza, gdyby uległy całkowitemu rozpadowi. Wielkość ta wystarczająco dobrze oddaje narażenie człowieka na pochodne radonu. Dawki powodowane przez emitowane pochodne radonu cząstki β i promieniowanie γ można uznać za nieistotne.

Najwyższe zmierzone C_α w polskich kopalniach węgla wynosiło 63 $\mu\text{J}/\text{m}^3$, przy czym należy zaznaczyć, że pomiar wykonano w pobliżu starych chodników pouranowych w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym. W kopalniach GZW zmierzone C_α nie przekraczały wartości 15 $\mu\text{J}/\text{m}^3$.

Ze względu na specyfikę powstawania narażenia na radon Prawo atomowe wyróżnia 3 rodzaje stanowisk pracy. Zgodnie z art. 23c kierownicy jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy: [...], 2) pod ziemią, [...], zapewniają w tych miejscach pomiar stężenia radonu lub stężenia energii potencjalnej promieniowania α krótkożyciowych produktów rozpadu radonu.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (DzU z 2017 r., poz. 1118) w podziemnych zakładach górniczych oprócz pozostałych czynników narażenia radiacyjnego mierzy się C_α . Częstotliwość pomiarów zależy od wartości stężenia dotąd mierzonego: dla $C_\alpha \leq 0,5 \mu\text{J}/\text{m}^3$ – pomiar raz na kwartał, dla $C_\alpha > 0,5 \mu\text{J}/\text{m}^3$ – pomiar raz na miesiąc.

Najczęściej wykorzystywaną techniką pomiarową służącą do wyznaczania C_α jest dozymetria termoluminescencyjna. Pomiar polega na zebraniu aerozoli na filtrze, nad którym umieszczona jest głowica z czułymi na promieniowanie α dozymetrami

termoluminescencyjnymi (*thermoluminescent dosimeter* – TLD) w odpowiednim układzie α . Zarejestrowana liczba zliczeń jest proporcjonalna do C_{α} . Dzięki zastosowaniu wcześniej wyznaczonych współczynników kalibracyjnych można wyznaczyć wartości C_{α} . Głowice, zwane przystawkami α ze względu na możliwość bezpośredniego stosowania ich wraz z typowymi pyłomierzami/aspiratorami wykorzystywanymi w górnictwie, ekspozuje się przez ok. 3 h.

Pomiarów C_{α} dokonuje się zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r.:

- 1) „w miejscach pracy w rejonie wylotu powietrza z wyrobisk ścianowych;
- 2) w miejscach pracy w rejonie wylotu powietrza w wyrobiskach korytarzowych z wentylacją odrębną;
- 3) w stacjonarnych stanowiskach pracy, takich jak komory, warsztaty i rozdzielnie;
- 4) w czasowych lub stałych miejscach pracy, gdzie moc kermy od źródła promieniowania zawierającego naturalne izotopy promieniotwórcze przekracza $0,6 \mu\text{Gy/h}$ ”.

Po ekspozycji przystawki należy jak najszybciej (nie później niż 6 tygodni od momentu przygotowania do pomiaru) dostarczyć do specjalistycznego laboratorium w celu odczytania i obliczenia C_{α} .

Specyfika wykonywania pomiarów w podziemnych trasach turystycznych

Polska jest krajem o dużej liczbie i różnorodności obiektów podziemnych, w których udostępniono ponad 240 tras turystycznych w 5 podstawowych kategoriach:



jaskinie



kopalnie



obiekty
pomilitarne



piwnice



pozostałe

Podziemna trasa turystyczna to całość lub część obiektu podziemnego, powstałego w sposób naturalny lub w wyniku działalności człowieka, dostosowana do bezpiecznego ruchu turystycznego, posiadająca wartości przyrodnicze lub kulturowe oraz zorganizowaną obsługę turystów przez uprawniony do tego podmiot. W podziemnych trasach turystycznych przy obsłudze zatrudnionych jest ponad 1,5 tys. osób (stan na 2025 r.).

Z uwagi na coraz większą popularność geoturystyki na świecie i w Polsce rośnie liczba osób zatrudnionych w turystycznych obiektach podziemnych, gdzie wykonuje się pracę w warunkach zawodowego narażenia m.in. na promieniowanie jonizujące. Źródłem tego promieniowania jest naturalny gaz promieniotwórczy – radon – i jego promieniotwórcze pochodne. Stężenia radonu w podziemnych trasach turystycznych mogą sięgać nawet kilku tysięcy Bq/m^3 , znacznie przekraczając poziom odniesienia 300Bq/m^3 , co może stanowić zagrożenia dla zdrowia

pracowników. Pomiar średniego stężenia radonu w powietrzu wykonuje się najczęściej za pomocą detektorów pasywnych.

Poniżej przedstawione są podstawowe zasady prowadzenia pomiarów:

- w zależności od długości trasy detektory umieszcza się w kilku miejscach, np. w 1/3, 1/2 i 2/3 jej długości lub gęściej w przypadku trasy bardziej rozbudowanej;
- detektor należy umieścić przede wszystkim tam, gdzie podczas oprowadzania zatrzymują się przewodnicy, oraz w miejscach stałej pracy w podziemiach (np. sklepiki, szatnie, magazyny);
- detektory należy umieszczać:
 - w strefie oddychania (na wysokości 1–2 m),
 - w odległości min. 20 cm od ściany (jeśli to możliwe),
 - w miejscu zabezpieczonym przed dostępem przypadkowych osób,
 - w miejscu zapewniającym swobodny dostęp powietrza do detektora;
- detektor w miarę możliwości należy umieszczać w miejscach, w których nie będzie narażony na bezpośrednie działanie wody lub na dużą wilgotność;
- przez cały czas ekspozycji detektora nie wolno go otwierać ani zmieniać jego umiejscowienia.

Dodatkowe wymagania warunków ekspozycji detektorów może podać laboratorium wykonujące pomiary.

Uwaga

Ze względu na specyfikę warunków panujących w podziemnych obiektach turystycznych nie można określić średniorocznego stężenia radonu na podstawie jednego

pomiaru trwającego miesiąc. Pomiar miesięczny powinien być traktowany jako rozpoznanie możliwości przekroczenia poziomu odniesienia. Niezbędne jest wykonanie pomiarów rocznych, np. 4 kwartalne ekspozycje detektorów śladowych.

Po otrzymaniu wyników pomiarów pracodawca musi:

- obliczyć dawki skuteczne, na jakie mogą być narażeni pracownicy podziemnej trasy turystycznej na podstawie zmierzonej wartości średniorocznego stężenia radonu oraz liczby godzin pracy pracownika w obiekcie podziemnym w ciągu roku;
- w przypadku przekroczenia ustawowej dawki granicznej 1 mSv/rok podjąć odpowiednie działania w celu obniżenia stężenia radonu lub ograniczenia wielkości dawki, na jakie narażeni będą pracownicy (np. skrócenie czasu pracy w obiekcie podziemnym);
- wprowadzić dozymetrię środowiskową, jeśli utrzymują się stężenia radonu, przy których dawki otrzymywane przez pracowników mogą przekroczyć ustawowe dawki graniczne.

Ze względu na specyfikę podziemnych tras turystycznych obniżenie wysokiego stężenia radonu nie zawsze jest możliwe.

Obniżenie stężenia radonu można uzyskać, zwiększając wentylację lub zmieniając jej kierunek oraz izolując miejsca, z których radon przedostaje się do trasy turystycznej. W przypadku tras naturalnych takie działania mogą jednak naruszyć ich ekosystem i je zniszczyć; można je przeprowadzić w przypadku tras sztucznych.

Z uwagi na względnie krótki czas przebywania turystów w podziemnych trasach turystycznych wpływ radonu na ich organizm w większości przypadków można pominąć.

W przypadku bardzo wysokich stężeń radonu zagrożenia dla zwiedzających pominąć nie można. W Polsce zarejestrowano stężenie $>20\,000\text{ Bq/m}^3$.

W przypadku zmiany warunków na trasach turystycznych (np. uruchomienie nowych miejsc do zwiedzania, zmiana warunków wentylacji lub organizacji pracy) pomiary należy powtórzyć we wszystkich miejscach, w których znajdują się stanowiska pracy.

Należy pamiętać, aby przed uruchomieniem nowej trasy turystycznej przeprowadzić pomiary stężeń radonu, żeby jeszcze na etapie jej przygotowywania podjąć odpowiednie działania obniżające stężenia lub tak zaplanować pracę, by zminimalizować dawki otrzymywane przez pracowników.

Wyrażenie stężenia energii potencjalnej promieniowania α produktów rozpadu radonu C_α (J/m^3) za pomocą wartości stężenia radonu C_{Rn} (Bq/m^3)

Podstawowe dane (okresy półrozpadu, stałe rozpadu, energie cząstek α i energie potencjalne promieniowania α pojedynczego nuklidu) dotyczące α -promieniotwórczych produktów rozpadu radonu przedstawiono w tabeli 1.

W wyliczaniu dawki skutecznej od narażenia na radon korzysta się z wartości C_α , która może być wyrażona poprzez stężenia w powietrzu krótkożyciowych produktów rozpadu radonu za pomocą wzoru:

$$C_\alpha = E_1 \cdot n_1 + E_2 \cdot n_2 + E_3 \cdot n_3 + E_4 \cdot n_4 \quad [\text{J}/\text{m}^3] \quad (1)$$

po podstawieniu $n_i = C_i/\lambda_i$ otrzymuje się:

$$C_\alpha = \frac{E_1}{\lambda_1} \cdot C_1 + \frac{E_2}{\lambda_2} \cdot C_2 + \frac{E_3}{\lambda_3} \cdot C_3 + \frac{E_4}{\lambda_4} \cdot C_4 \quad [\text{J}/\text{m}^3] \quad (2)$$

gdzie:

E_i – energia potencjalna promieniowania α poszczególnego produktu rozpadu radonu (J),

n_i – liczba nuklidów w przeliczeniu na jednostkę objętości gazu ($1/\text{m}^3$),

λ_i – stała rozpadu poszczególnego produktu rozpadu radonu (1/s),

C_i – stężenie aktywności poszczególnego produktu rozpadu radonu (Bq/m^3).

Tabela 1. Dane dotyczące α-promieniotwórczych produktów rozpadu radonu [wg IAEA Nuclear Data]

Izotop	Okres półrozpadu	Stała rozpadu [1/s]	Energia cząstek α emitowanych podczas przemiany promieniotwórczej		Energia potencjalna promieniowania α pojedynczego nuklidu [J]
			MeV	μJ	
$^{218}\text{Po}(\text{RaA})$	$T_1 = 3,097 \text{ min} = 185,8 \text{ s}$	$\lambda_1 = 3,730 \cdot 10^{-3}$	$E_A = 6,002$	$E_A = 0,9616 \cdot 10^{-6}$	$E_1 = E_A + E_C = 2,1932 \cdot 10^{-12}$
$^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$	$T_2 = 27,06 \text{ min} = 1623,6 \text{ s}$	$\lambda_2 = 0,427 \cdot 10^{-3}$	-	-	$E_2 = E_C = 1,2316 \cdot 10^{-12}$
$^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$	$T_3 = 19,71 \text{ min} = 1182,6 \text{ s}$	$\lambda_3 = 0,586 \cdot 10^{-3}$	-	-	$E_3 = E_C = 1,2316 \cdot 10^{-12}$
$^{214}\text{Po}(\text{RaC}')$	$T_4 = 163,46 \mu\text{s} = 0,00016346 \text{ s}$	$\lambda_4 = 0,424 \cdot 10^4$	$E_C = 7,687$	$E_C = 1,2316 \cdot 10^{-6}$	$E_4 = E_C = 1,2316 \cdot 10^{-12}$

1 MeV = $1,60217733 \cdot 10^{-7} \mu\text{J}$

Zamiennie względem pojęcia C_α często stosuje się pojęcie stężenie równoważne radonu (C_{eq}). Jest to stężenie radonu będące w równowadze z krótkożyciowymi produktami rozpadu, które miałyby takie samo stężenie energii potencjalnej promieniowania α jak istniejąca mieszanina nieznajdująca się w stanie równowagi promieniotwórczej.

Na podstawie tej definicji można sformułować równanie:

$$C_\alpha = \frac{E_1}{\lambda_1} \cdot C_1 + \frac{E_2}{\lambda_2} \cdot C_2 + \frac{E_3}{\lambda_3} \cdot C_3 + \frac{E_4}{\lambda_4} \cdot C_4 = C_{\text{eq}} \cdot \left(\frac{E_1}{\lambda_1} + \frac{E_2}{\lambda_2} + \frac{E_3}{\lambda_3} + \frac{E_4}{\lambda_4} \right) \quad (3)$$

Współczynnik równowagi F (-), będący ilorazem stężenia równoważnego radonu i aktualnego stężenia aktywności radonu, przyjmuje więc postać:

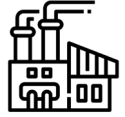
$$F = \frac{C_{\text{eq}}}{C_{\text{Rn}}} = \frac{C_\alpha}{\left(\frac{E_1}{\lambda_1} + \frac{E_2}{\lambda_2} + \frac{E_3}{\lambda_3} + \frac{E_4}{\lambda_4} \right) \cdot C_{\text{Rn}}} \quad (4)$$

Po wstawieniu stałych wartości z tabeli 1 wartość współczynnika równowagi F wynosi:

$$F = \frac{C_\alpha \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]}{5,57 \cdot 10^{-9} [\text{J} \cdot \text{s}] \cdot C_{\text{Rn}} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]} \quad (5)$$

Zatem wzór pozwalający wyrazić C_α (J/m^3) za pomocą wartości stężenia radonu C_{Rn} (Bq/m^3) to:

$$C_\alpha = 5,57 \cdot 10^{-9} [\text{J} \cdot \text{s}] \cdot C_{\text{Rn}} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right] \cdot F [-] \quad (6)$$



ISBN 978-83-63253-75-2

