

Analiza dostępnych rozwiązań technicznych służących ograniczeniu stężeń radonu oraz środków ochrony pracowników

Katarzyna Wołoszczuk, Zuzanna Pawłowska



Analiza dostępnych rozwiązań technicznych służących ograniczeniu stężeń radonu oraz środków ochrony pracowników

Autorzy:

dr inż. Katarzyna Wołoszczuk
mgr inż. Zuzanna Pawłowska

Recenzenci:

prof. dr hab. Krzysztof Kozak
dr hab. Dagmara Tchorz-Trzeciakiewicz



@Copyright Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
Warszawa 2025

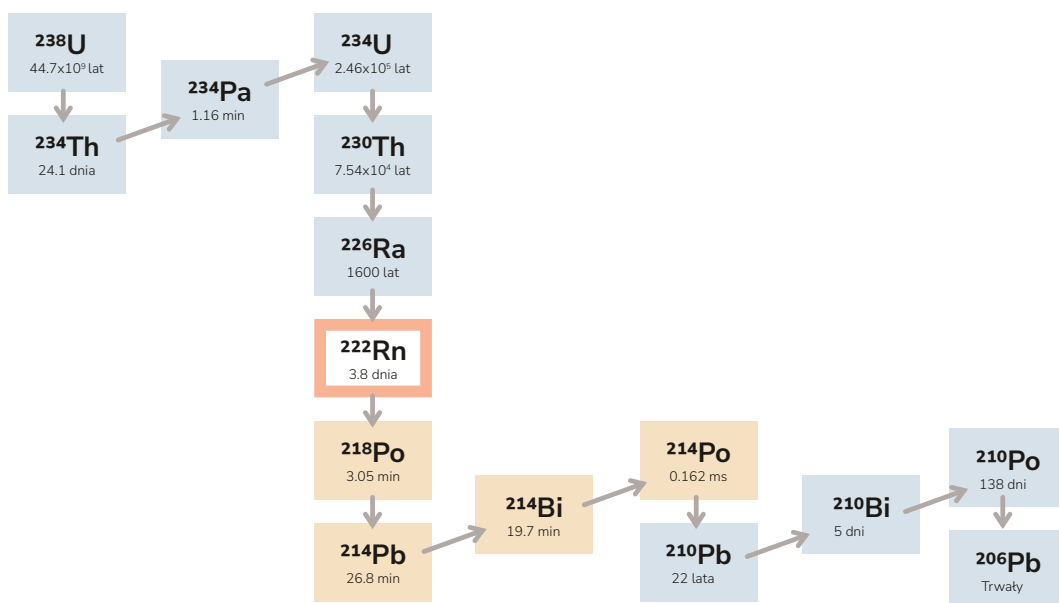
Spis treści:

1. Podstawowe informacje o radonie	5
2. Przepisy prawne dotyczące ochrony przed radonem w miejscach pracy	9
3. Charakterystyka miejsc pracy ze wskazaniem na miejsca pracy z wysokim prawdopodobieństwem przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m^3	14
3.1 Prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m^3 ze względu na budowę geologiczną	15
4. Źródła radonu oraz główne drogi dostawania się radonu do budynku	19
5. Dostępne rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężenia radonu wewnątrz budynków	22
5.1 Techniki redukcji stężeń dla nowo planowanych budynków	23
5.2 Techniki redukcji stężeń radonu w istniejących budynkach	26
5.3 Rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężeń radonu instalowane na zewnątrz budynku	34
6. Dostępne środki ochrony służące zmniejszeniu narażenia pracowników na radon	37
7. Zestawienie środków ograniczających stężenie radonu [19]	40
8. Podsumowanie	42
9. Bibliografia	44
10. Spis ilustracji	46

Opracowano na podstawie wyników programu wieloletniego „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy – VI etap, okres realizacji: lata 2023–2025, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy.

1. Podstawowe informacje o radonie

Radon to jedyny naturalnie występujący radionuklid, który w normalnych warunkach środowiskowych występuje jako gaz szlachetny. Został odkryty w 1900 roku przez Friedricha Dorna, który zauważył nieznany wcześniej gaz jonizujący, wydobywający się z głębszych warstw materiałów zawierających związki radu. Po obniżeniu temperatury radonu poniżej -71°C , czyli jego temperatury zamarzania, emituje on żółte światło, natomiast w temperaturach poniżej -180°C świeci na pomarańczowo-czerwono. Właśnie ta cecha sprawiła, że w chwili odkrycia nadano mu nazwę niton (oznaczającą "łśniący").



Rysunek 1. Szereg uranowy.

W środowisku naturalnym występują 3 izotopy radonu, jednak za największe zagrożenie dla zdrowia człowieka odpowiada izotop radonu o liczbie masowej 222 (^{222}Rn). Jego okres połowicznego rozpadu wynosi 3,8 dnia, co mimo pozornie krótkiego czasu pozwala mu przenikać z gleby do budynków lub atmosfery. Jako gaz radon jest mobilny, co stanowi kluczowe źródło ryzyka zdrowotnego. Jest substancją bezbarwną, bezwoną i niepalną, o gęstości wynoszącej $9,96\text{ kg/m}^3$. Jest około osiem razy cięższy od powietrza, co wpływa na to, że jego stężenie w atmosferze zmienia się w zależności od wysokości nad ziemią.

Produkty rozpadu radonu to promieniotwórcze izotopy metali ciężkich, które dzielą się na krótko i długożyciowe (Rysunek 1, Tabela 1). Do grupy krótkożyciowych produktów należą cztery izotopy: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi oraz ^{214}Po , natomiast produkty długożyciowe to: ^{210}Pb , ^{210}Bi i ^{210}Po . W Tabeli 1 przedstawiono kluczowe właściwości poszczególnych izotopów.

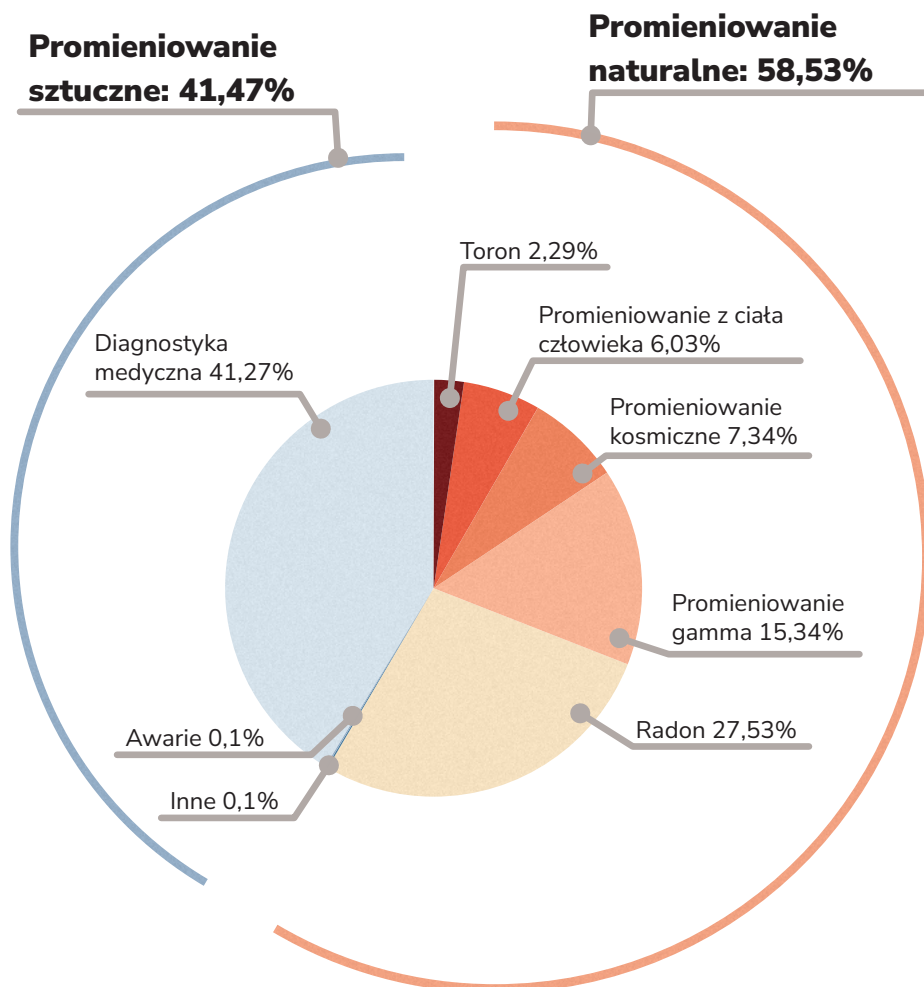
Tabela 1. Produkty rozpadu radonu [1].

Radionuklid	Okres połowicznego rozpadu	Energia promieniowania [MeV]		
		alfa	beta	gamma
^{222}R	3,82 dnia	5,5	-	-
$^{218}\text{Po}^*$	3,05 min	6,0	-	-
$^{214}\text{Pb}^*$	26,8 min		0,67 0,73 1,02	0,295 0,352
$^{214}\text{Bi}^*$	19,9 min		1,00 1,51 3,26	0,609 1,120 1,764
$^{214}\text{Po}^*$	165 μs	7,7	-	-
^{210}Pb	22,3 lata	-	0,015 0,061	0,047
^{210}Bi	5,013 dnia	-	1,161	-
^{210}Po	138,4 dni	5,3	-	-
^{206}Pb	stabilny	-	-	-

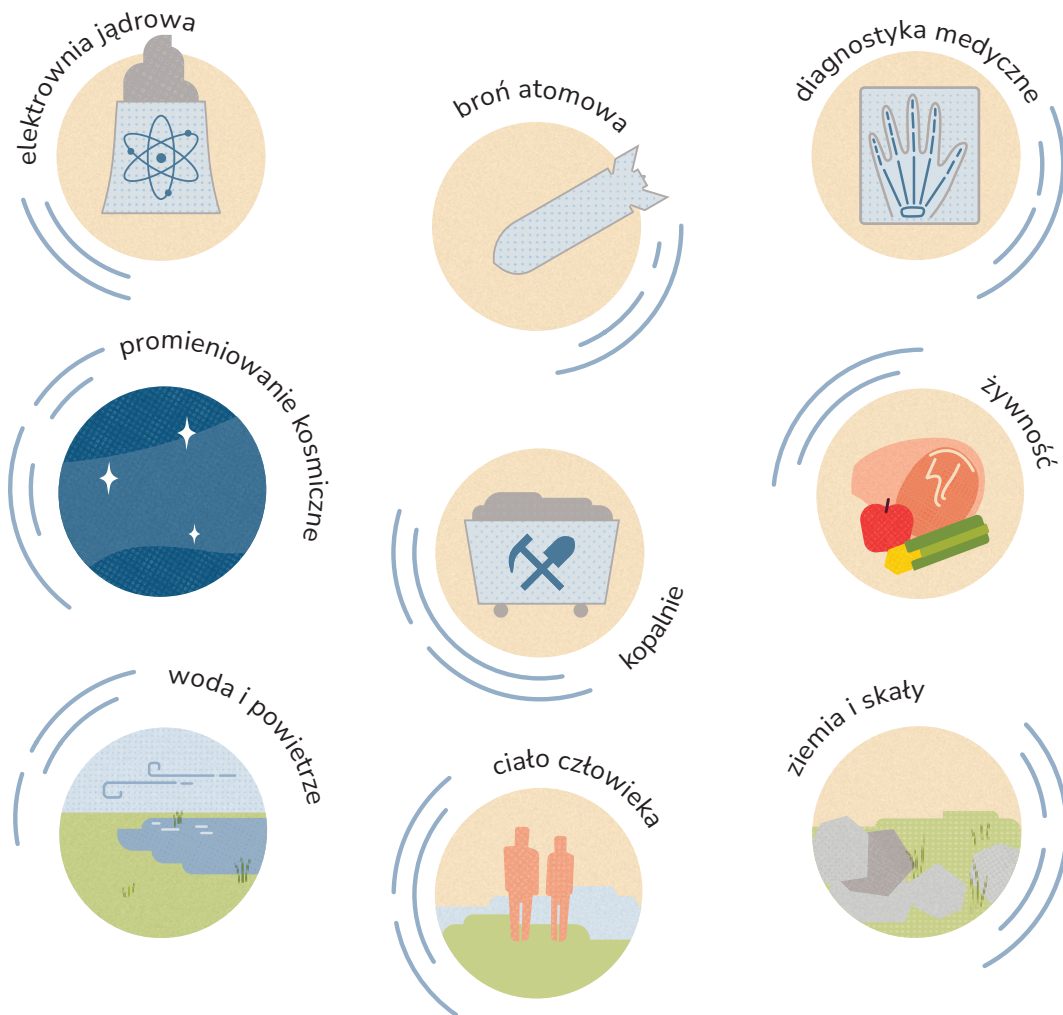
* krótkożyciowe produkty rozpadu radonu

Zagrożenie zdrowotne związane z radonem wynika z jego powszechnej obecności w środowisku naturalnym oraz zdolności przenikania do pomieszczeń zajmowanych przez ludzi. W warunkach słabej wentylacji produkty rozpadu radonu ulegają koncentracji i, przylączaając się do aerozoli środowiskowych, unoszą się w powietrzu, co stanowi zagrożenie dla układu oddechowego populacji. W porównaniu do innych źródeł promieniowania, radon odpowiada za dominującą część

dawki promieniowania, stanowiąc 27,53 % ekspozycji[2] na wszystkie, tj. naturalne i sztuczne źródła narażenia na promieniowanie jonizujące (Rysunek 2)



Rysunek 2. Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej [2].



Rysunek 3. Źródła promieniowania jonizującego.

Od kilku dekad wiadomo, że długotrwałe przebywanie w miejscach o wysokim stężeniu radonu w powietrzu może zwiększać ryzyko zachorowania na nowotwory płuc. Obecnie ustalono, że główną przyczyną zagrożenia są krótkożyciowe produkty jego rozpadu, a nie sam radon. Wdychany radon, ze względu na dłuższy okres połowicznego rozpadu, rozpada się w układzie oddechowym jedynie w niewielkim stopniu i większość jest ponownie wydychana. Sytuacja zmienia się w przypadku krótkożyciowych pochodnych radonu (Rysunek 1), które są metalami ciężkimi. Podczas oddychania znaczna część tych produktów osadza się w drogach oddechowych, gdzie następuje ich szybki rozpad. Krótkożyciowe produkty rozpadu radonu osadzają się głównie w układzie oddechowym, skąd tylko niewielka ich część przedostaje się do krwiobiegu i dalej do innych narządów, narażając je na znacznie

mniejsze dawki niż płuca. Szacuje się, że aż 95% dawki efektywnej od wdychanego radonu[3] i jego pochodnych przypada na płuca. Gdyby we wdychanym powietrzu znajdował się jedynie radon, poziom tej dawki byłby wielokrotnie niższy.

2. Przepisy prawne dotyczące ochrony przed radonem w miejscach pracy

W 2013 roku opublikowana została Dyrektywa Rady 2013/59/EURATOM[4], w której dużą część poświęcono problemom związanym z zagrożeniem radonowym w budynkach mieszkalnych i w miejscach pracy. W ślad za tą dyrektywą wprowadzono zmiany w polskim Prawie atomowym[5].

Najistotniejszą zmianą w przepisach, było określenie poziomu odniesienia średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu wewnątrz pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi i w miejscach pracy. Zgodnie z definicją podaną w Prawie atomowym, średnioroczne stężenie radonu jest to wartość stężenia radonu oszacowana na podstawie pomiarów tego stężenia w okresie nie krótszym niż jeden miesiąc, odpowiadająca średniemu stężeniu radonu w powietrzu w okresie roku kalendarzowego. W krajach europejskich ustanowiona wartość poziomu odniesienia jest różna, ale najczęściej znajduje się w przedziale 100-300 Bq/m³.

W Polsce poziom odniesienia został ustalony na poziomie 300 Bq/m³.

W Prawie atomowym określono również miejsca pracy, w których należy wykonać pomiary radonu, tj.:

- » **zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach wskazanych w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia [5],**
- » **pod ziemią,**

» **związane z uzdatnianiem wód podziemnych na terenach wskazanych w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia [5],**

Rozporządzenie Ministra Zdrowia wskazuje tereny, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia 300 Bq/m^3 . W Rozporządzeniu wymieniono 27 powiatów (Rysunek 4) zlokalizowanych w południowej Polsce. Zalicza się do nich:

W województwie dolnośląskim:

powiat dzierżoniowski (1);	powiat trzebnicki (7);
powiat jeleniogórski (2);	powiat wałbrzyski (8);
powiat kamiennogórski (3);	powiat ząbkowicki (9);
powiat kłodzki (4);	powiat zgorzelecki (10);
powiat lwówecki (5);	powiat złotoryjski (11).
powiat polkowicki (6);	

W województwie opolskim:

powiat nyski (1);	powiat prudnicki (2)
-------------------	----------------------

W województwie podkarpackim:

powiat bieszczadzki (1);	powiat leski (4);
powiat jasielski (2);	powiat mielecki (5);
powiat krośnieński (3);	powiat sanocki (6).

W województwie świętokrzyskim:

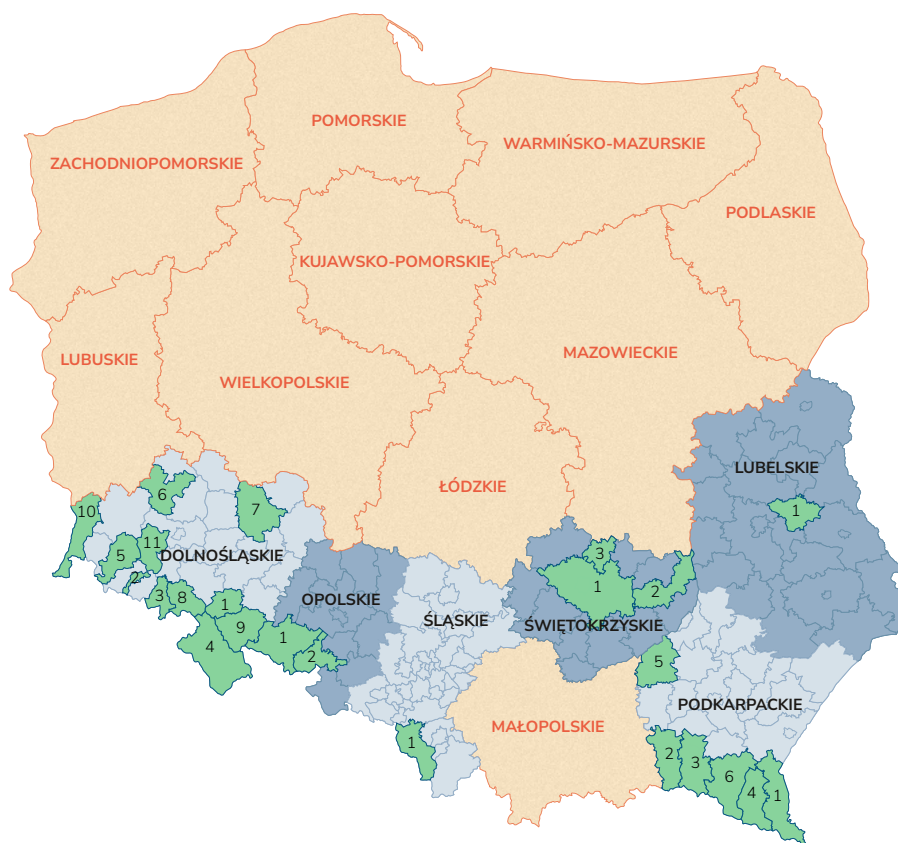
powiat kielecki (1);	powiat skarżyski (3)
powiat opatowski (2);	

W województwie lubelskim:

powiat tomaszowski (1).

W województwie śląskim:

powiat cieszyński (1).



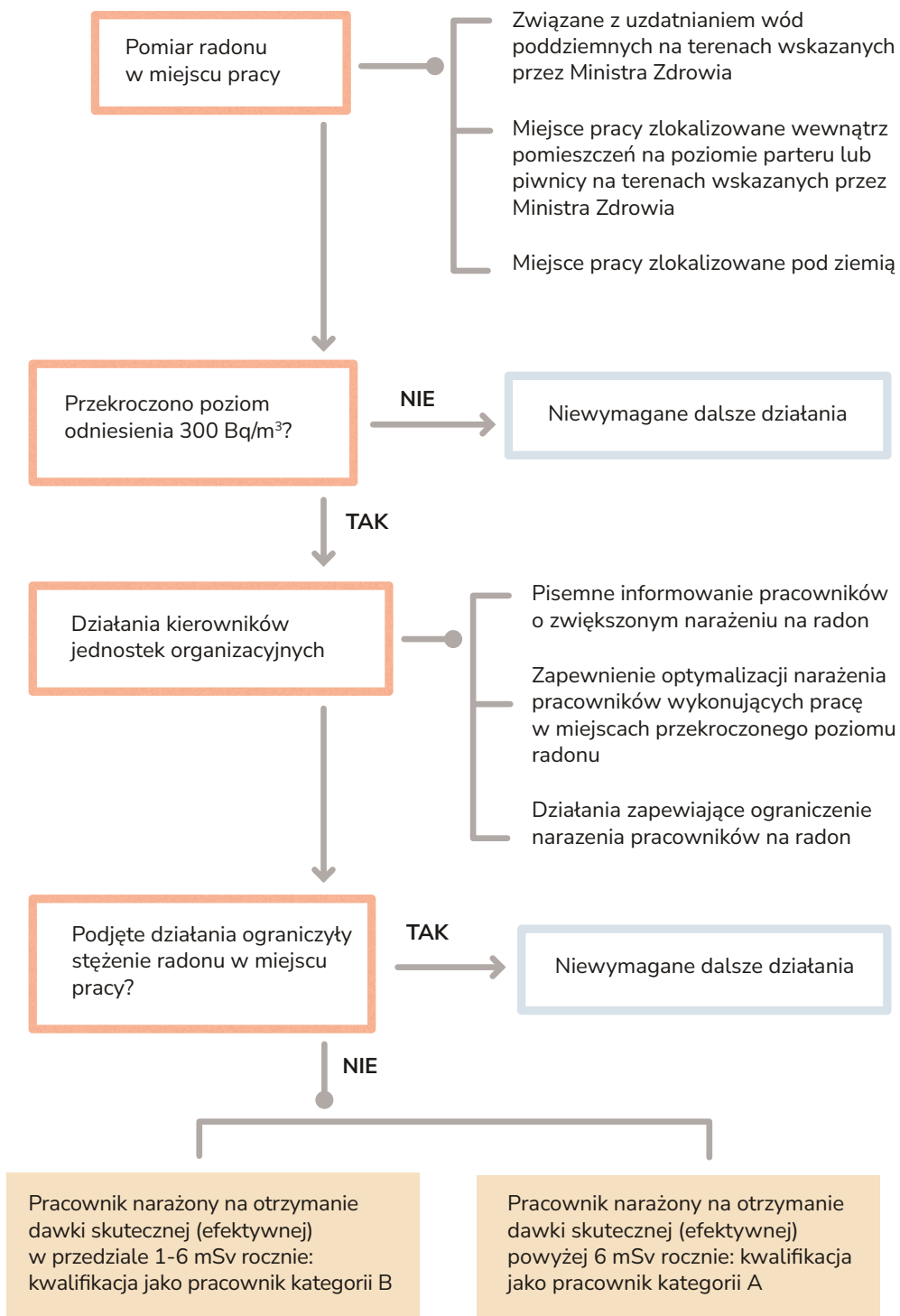
Rysunek 4. Powiaty wskazane w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia (oznaczone kolorem zielonym)[6].

Pomiary radonu we wskazanych miejscach pracy wykonują wyłącznie laboratoria posiadające akredytację przyznaną przez Polskie Centrum Akredytacji. W związku z tym, że czas pomiaru stężenia radonu nie może być krótszy niż 30 dni, dedykowaną metodą jest metoda detektorów śladowych. Zalecenia dotyczące m.in. metody pomiaru opisane zostały w Krajowym planie działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy[7].

W sytuacji, gdy w danym pomieszczeniu pracy wykonane pomiary wskażą na przekroczenie poziomu odniesienia 300 Bq/m^3 , kierownik jednostki organizacyjnej, zgodnie z wytycznymi Prawa atomowego powinien:

- » **zapewnić optymalizację narażenia pracowników wykonujących pracę w tych miejscach pracy,**
- » **informować na bieżąco na piśmie takich pracowników o zwiększonym narażeniu na radon,**
- » **podjąć działania zapewniające ograniczenie narażenia pracowników na radon, a jeśli to nie przyniesie efektów, ich kwalifikację do kategorii B lub a narażenia na promieniowanie jonizujące.**

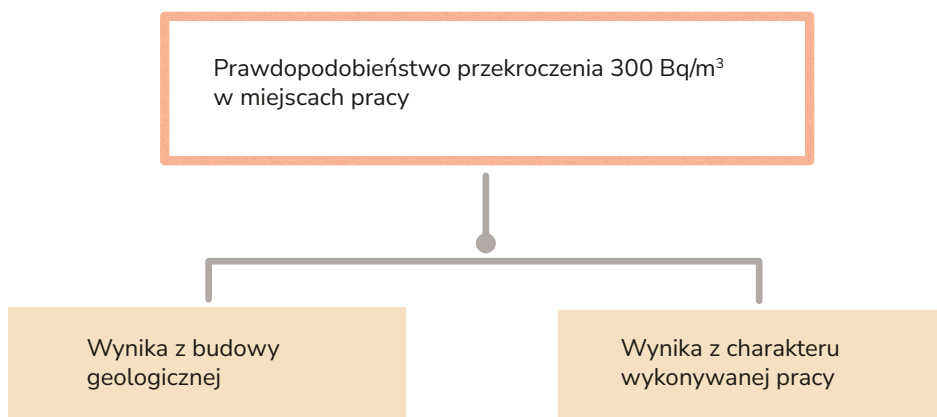
Na Rysunku 5 przedstawiono schemat działań związanych z pomiarami radonu w miejscach pracy.



Rysunek. 5 Obowiązujące przepisy, schemat postępowania.

3. Charakterystyka miejsc pracy ze wskazaniem na miejsca pracy z wysokim prawdopodobieństwem przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³

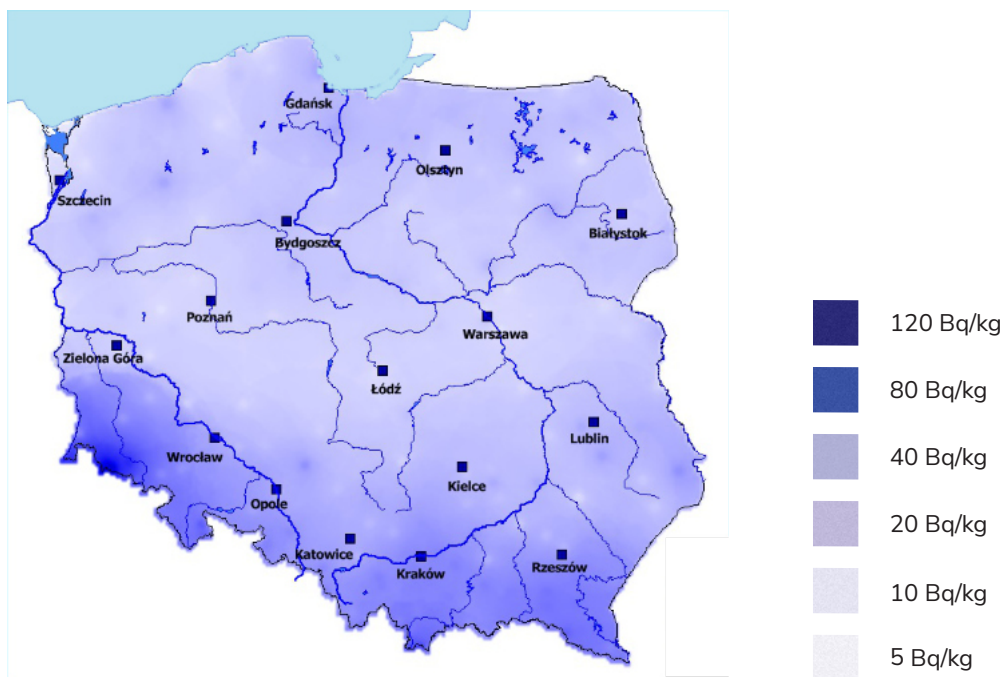
Miejsca pracy, w których występuje wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³ można podzielić na dwie kategorie (Rysunek 6). Pierwsza z nich obejmuje przypadki, w których podwyższone stężenie radonu wynika z budowy geologicznej terenu, na którym zlokalizowane jest miejsce pracy. Druga natomiast dotyczy charakteru wykonywanej pracy, który sprzyja zwiększonej ekspozycji na radon.



Rysunek 6. Kategorie miejsc pracy, w których występuje wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³.

3.1 Prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³ ze względu na budowę geologiczną

Radon jest elementem szeregu uranowego, w którego skład wchodzi m.in. uran ²³⁸U oraz rad ²²⁶Ra. Skały zawierają uran, choć w większości przypadków są to śladowe ilości. W wyniku procesów chemicznych i mechanicznych skały ulegają erozji, co prowadzi do powstawania gleb, które w konsekwencji również zawierają śladowe ilości uranu. Zawartość uranu w glebie jest zazwyczaj zbliżona do jego zawartości w skale, z której gleba powstała, a ponieważ niektóre rodzaje skał mają wyższą niż przeciętną zawartość uranu, skutkuje to występowaniem terenów o podwyższonym stężeniu radonu. Do skał o wyższej zawartości uranu należą m.in. skały wulkaniczne, granity, ciemne łupki, skały osadowe bogate w fosfor oraz skały metamorficzne, które powstały ze skał magmowych bądź osadowych, zawierających podwyższoną ilość uranu. To, w jakich ilościach i jak równomiernie uran jest rozmieszczony w skałach i glebie, w połączeniu z przepuszczalnością gleby, mają kluczowy wpływ na możliwość wydostania się radonu na powierzchnię.

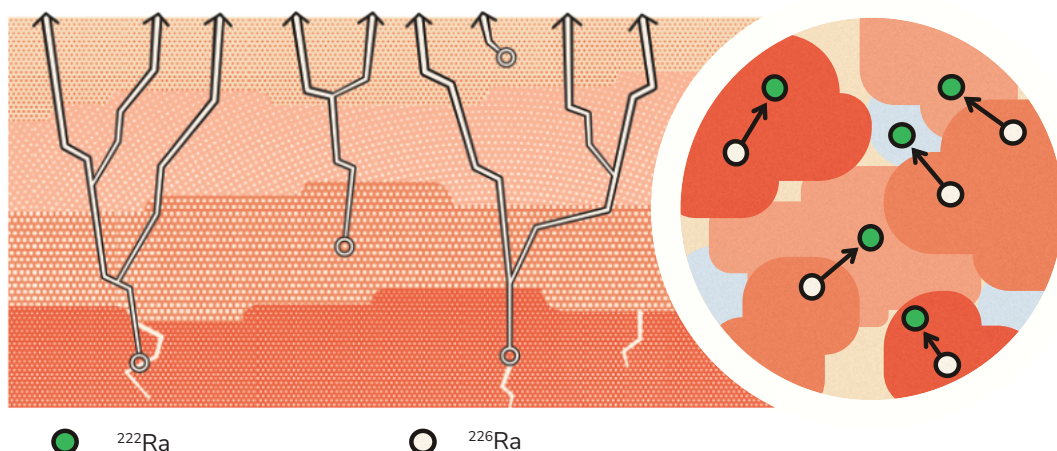


Rysunek 7. Rozkład stężenia ²²⁶Ra w powierzchniowej warstwie gleby na obszarze Polski [8].

W Polsce obszary, na których istnieje ryzyko podwyższonego stężenia radonu wewnątrz budynków, zlokalizowane są głównie w południowej części kraju.

Rozkład stężenia jego pierwiastka macierzystego, czyli ^{226}Ra , w powierzchniowej warstwie gleby, przedstawiony na Rysunku 7, dobrze obrazuje tereny, gdzie można spodziewać się podwyższonych stężeń radonu.

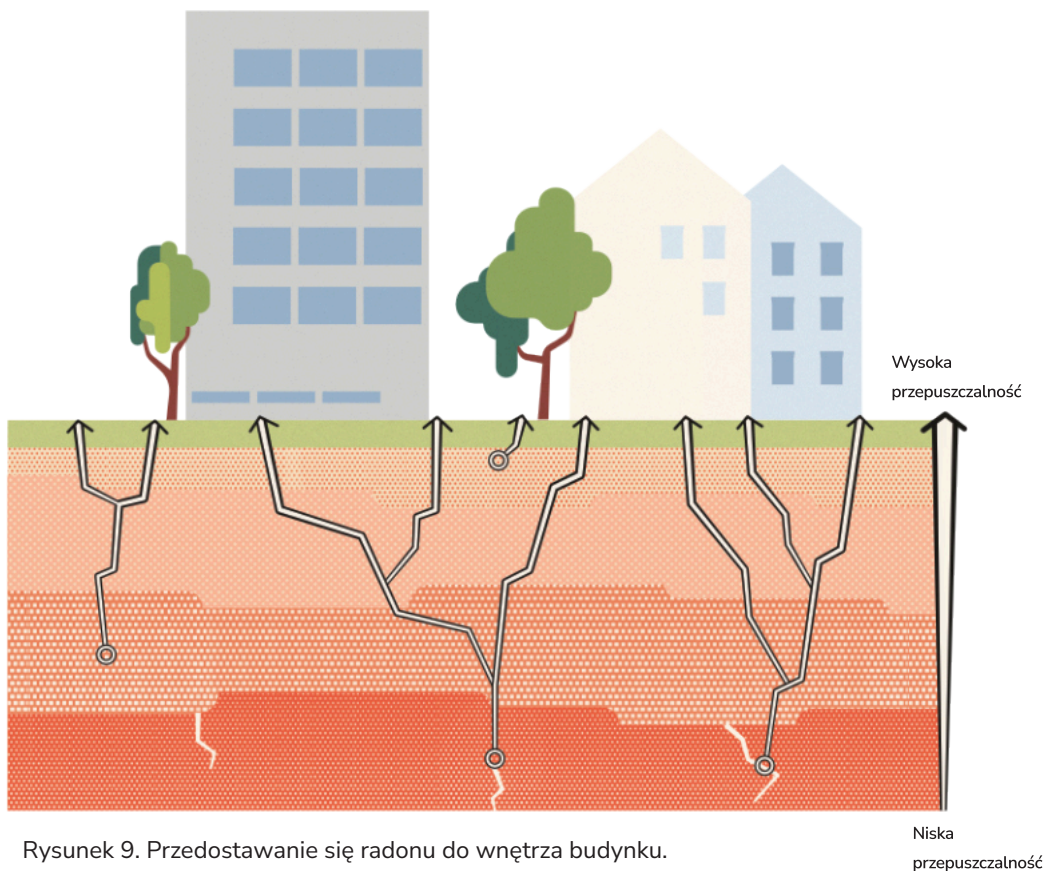
Miejsca pracy zlokalizowane na tych terenach, niezależnie od charakteru wykonywanej pracy, cechują się wysokim prawdopodobieństwem podwyższonego stężenia radonu. W tym przypadku radon przenika do budynków głównie z podłoża, dlatego ryzyko to dotyczy przede wszystkim pomieszczeń usytuowanych w piwnicach lub na parterze. Ryzyko jest tym większe im bardziej przepuszczalny jest grunt, na której usytuowany jest budynek (Rysunek 8) oraz im gorszy jest stan techniczny budynku.



Rysunek 8. Przepuszczalność gruntu.

Gleba przepuszczalna charakteryzuje się zdolnością do swobodnego przepływu powietrza glebowego. Przepuszczalność ta zależy od szeregu cech, takich jak rozmiar, kształt, liczba i orientacja porów, a także od zawartości wody. Grunty drobnoziarniste, takie jak gliny i ły, cechują się niską porowatością, co skutkuje mniejszą przepuszczalnością w porównaniu do gruntów gruboziarnistych, takich jak piaski i żwiry. Większe ziarna tworzą większe pory, co zmniejsza opór dla migracji cieczy i gazów i prowadzi do wyższej przepuszczalności. Zakres przepuszczalności gruntów, od grubych piasków po muliste gliny, obejmuje ponad sześć rzędów wielkości.

Należy mieć na uwadze, że nawet nieprzepuszczalne podłoże nie stanowi całkowitej bariery ochronnej przed przenikaniem radonu. Pomimo tego, że podłoża tego typu charakteryzują się ograniczoną przepuszczalnością dla gazów, w wyniku naturalnych procesów geologicznych, ruchów masowych czy uszkodzeń mechanicznych, mogą w nim powstać uskoki, szczeliny i pęknięcia. Takie defekty strukturalne, jak przedstawiono na Rysunku 9, mogą umożliwić przedostawanie się radonu do wnętrza budynku.



Rysunek 9. Przedostawanie się radonu do wnętrza budynku.

3.2 Prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m³ ze względu na charakter wykonywanej pracy

Inną kategorią są miejsca pracy, w których ze względu na specyfikę wykonywanych zadań lub ich lokalizację można się spodziewać podwyższonych stężeń radonu. Należą do nich:

- » stacje uzdatniania wody,

- » prace wykonywane pod ziemią
 - » górnictwo,
 - » podziemne trasy turystyczne,
 - » jaskinie turystyczne,
 - » podziemne magazyny,
 - » prace budowlane (np. budowa tuneli)
- » przetwarzanie materiałów NORM (naturally occurring radioactive materials)
- » zakłady energetyki ciepłej.

W każdym z wymienionych miejsc pracy występuje inne źródło radonu bezpośrednio związane z wykonywaną pracą:

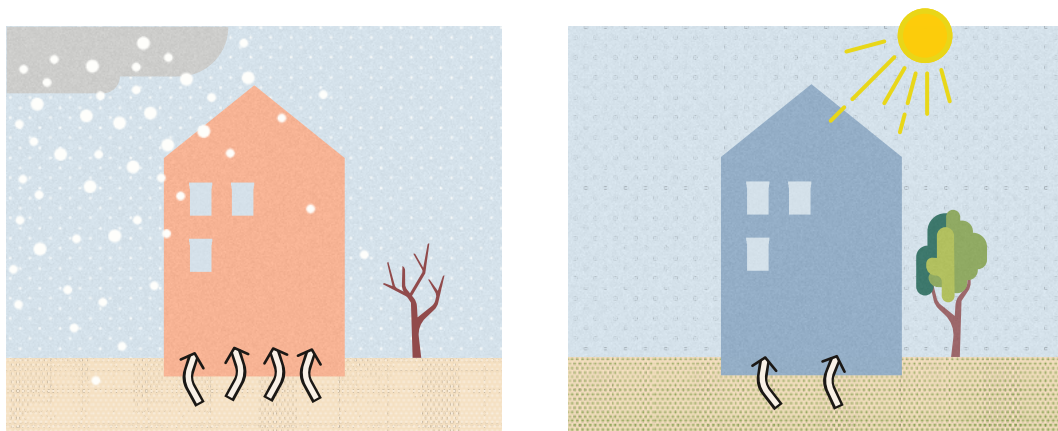
- » w stacjach uzdatniania wody wynika z obecności w wodach gruntowych, a przedostaje się do powietrza w wyniku prowadzonych procesów uzdatniania. Przy napowietrzaniu czy filtrowaniu wody, radon rozpuszczony w wodzie może być uwalniany do powietrza i w konsekwencji, w zamkniętych pomieszczeniach stacji, może występować w wysokich stężeniach.
- » Materiały, takie jak rudy uranu, fosfaty, boksyt czy piaski cyrkonowe, zawierają naturalnie występujące izotopy promieniotwórcze, w tym uran. Procesy przetwarzania, czy to mechaniczne, jak kruszenie, mielenie, przesiewanie i transportowanie, czy chemiczne stosowane do ekstrakcji metali z rud, takie jak ługowanie kwasami czy zasadowe przetwarzanie tych materiałów, uwalniają radon do otoczenia. Dodatkowo przetwarzanie materiałów NORM generuje odpady, które również mogą zawierać radon. Składowanie tych odpadów w zamkniętych lub półzamkniętych miejscach może przyczyniać się do podwyższonych stężeń radonu w otoczeniu
- » w zakładach ciepłych źródłem radonu może być transport i spalanie materiału opałowego.

- » wysokie stężenie radonu w miejscach pracy pod ziemią jest wynikiem jego naturalnego pochodzenia, znacznie krótszej drogi, którą musi pokonać żeby dostać się do pomieszczenia, ograniczonej wentylacji i specyficznych warunków geologicznych, które sprzyjają jego akumulacji.

4. Źródła radonu oraz główne drogi dostawania się radonu do budynku

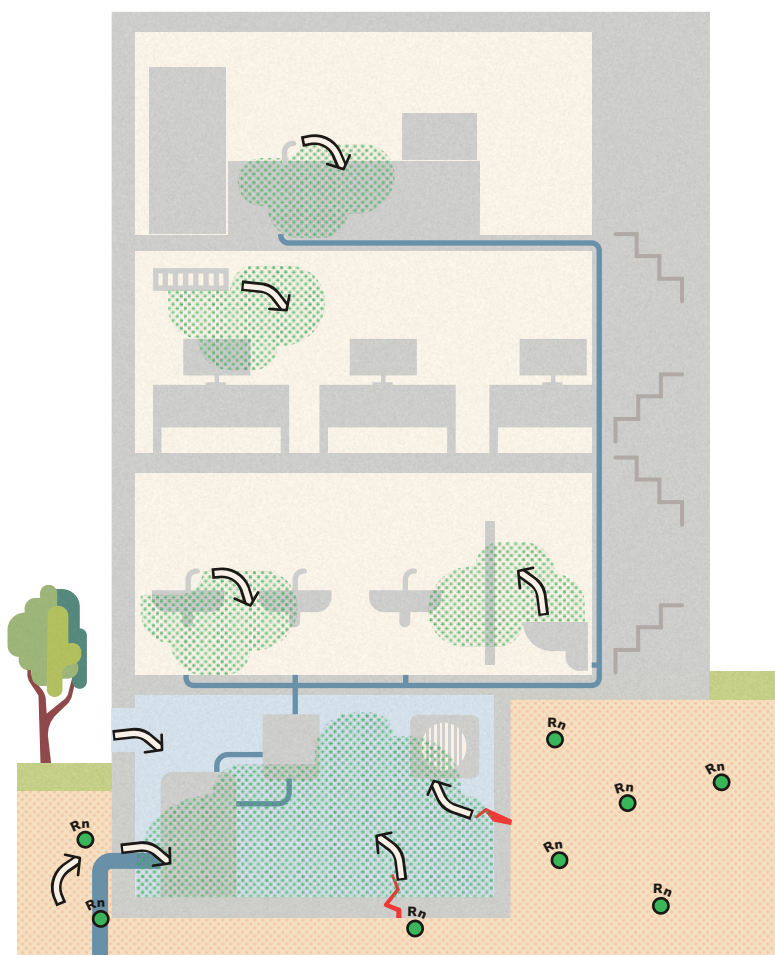
Aby skutecznie dobrać odpowiednią metodę redukcji stężenia radonu, konieczne jest dokładne zrozumienie mechanizmów jego przenikania do budynku. Mechanizmy te różnią się w zależności od przyczyny podwyższonego stężenia radonu, która może wynikać zarówno z warunków geologicznych, jak i z charakteru wykonywanej pracy w danym obiekcie. W sytuacji, gdy źródło radonu związane jest z charakterem wykonywanej działalności, jego pochodzenie jest dobrze zidentyfikowane, co umożliwia bardziej precyzyjne dostosowanie strategii działań prowadzących do obniżania jego stężenia.

W przypadku, gdy dominującą przyczyną podwyższonego stężenia radonu jest budowa geologiczna, najczęstszym obserwowanym mechanizmem umożliwiającym przenikanie radonu do wnętrza budynku jest tzw. „efekt kominowy” (Rysunek 10).



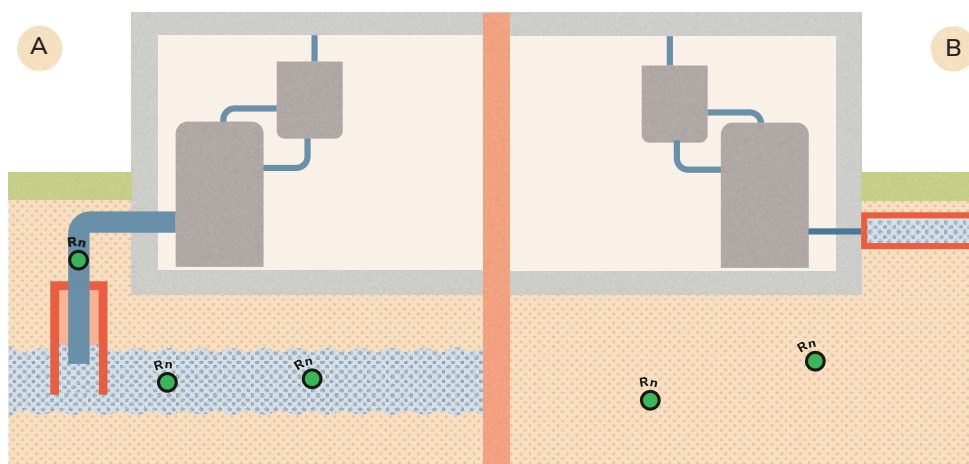
Rysunek 10. Intensywność efektu kominowego w zależności od pory roku.

Efekt ten polega na zasysaniu radonu do wnętrza budynku z gruntu wskutek niewielkiej różnicy ciśnień, powstającej w wyniku różnicy temperatur między wnętrzem a zewnątrz budynku. Ciepłe powietrze wewnątrz budynku unosi się do góry. To z kolei powoduje zasysanie radonu z gruntu do wnętrza budynku. Podciśnienie, rzędu kilku paskali (Pa), jest tym większe, im większa jest różnica temperatur, dlatego efekt kominowy najsilniej oddziałuje w okresie, gdy budynki są ogrzewane. W Polsce zazwyczaj są to miesiące od połowy września do połowy kwietnia. W związku z tym, że radon jest gazem, nawet niewielkie nieszczelności budynku wystarczają, aby został zassany do wnętrza budynku. Nieszczelności te mogą obejmować pęknięcia w fundamentach, połączenia techniczne (rury, przewody) oraz pęknięcia w ścianach stykających się z gruntem (Rysunek 11).



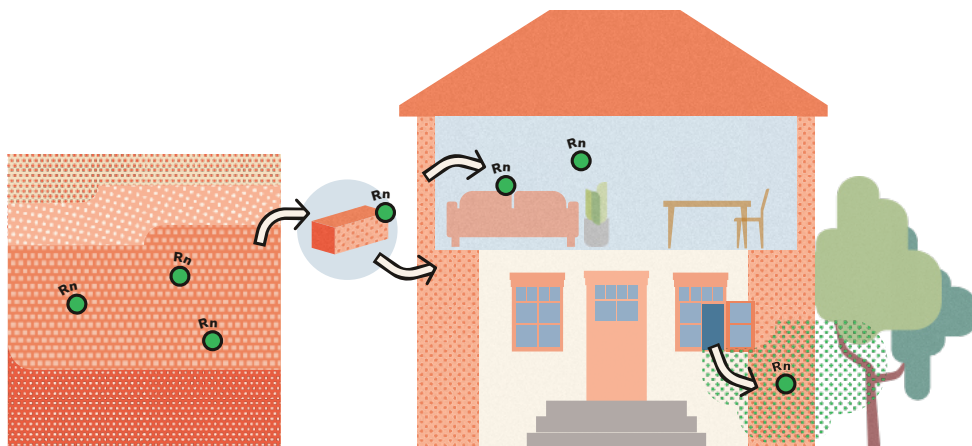
Rysunek 11. Drogi przenikania radonu do wnętrza budynku.

Innym źródłem radonu w budynku może być woda dostarczana i stosowana w budynku, szczególnie, gdy pochodzi z lokalnego ujęcia (wody podziemne). Więksi dostawcy wody (zaopatrujący więcej niż 50 osób), mają obowiązek badać ją, m.in. na zawartość radonu i podjąć działania, gdy określone wartości zostają przekroczone [9]. Nie dotyczy to prywatnych ujęć wody, jak na przykład studni na posesji, zaopatrującej w wodę jedno gospodarstwo domowe (Rysunek 12).



Rysunek 12. Woda źródłem radonu w budynku. A) ujęcie własne B) ujęcie miejskie.

Kolejnym źródłem radonu w budynkach mogą być materiały budowlane, takie jak beton, cegły, naturalne kamienie budowlane i materiały wykorzystujące produkty uboczne przemysłu, takie jak fosfogips, żużel wielkopiecowy i popiół lotny węglowy [10]. Zawierają one naturalne izotopy promieniotwórcze, takie jak ^{226}Ra czy ^{232}Th . W Polsce materiały budowlane wprowadzane na rynek muszą posiadać odpowiednie certyfikaty potwierdzające niską zawartość tych pierwiastków zgodnie z obowiązującymi limitami [11]. Problem ten dotyczy głównie budynków, które były budowane zanim zaczęły obowiązywać przepisy prawne (Rysunek 13). W starszych konstrukcjach oprócz materiałów budowlanych źródłem radonu mogą być elementy wykończenia wnętrz, jak na przykład płytki ceramiczne, w których jako barwnik stosowane były sole uranowe. Ich produkcji zaprzestano w latach siedemdziesiątych. We współczesnych konstrukcjach źródłem radonu mogą być takie elementy wykończenia wnętrz, jak płyty granitowe lub płytki ceramiczne zawierające piasek cyrkonowy. Nie jest to jednak znaczące źródło radonu i najczęściej nie stanowi zagrożenia dla mieszkańców. Podwyższone stężenia radonu mogą pojawić się natomiast w zamkniętych przestrzeniach sklepów lub magazynów z płytkami ceramicznymi lub z płytami granitowymi [12].



Rysunek 13. Materiały budowlane jako źródło radonu.

W literaturze naukowej gaz ziemny wskazuje się jako jedno z potencjalnych źródeł radonu w budynkach. Gaz ziemny wydobywany jest z głębokich warstw skorupy ziemskiej, istnieje ryzyko, że jego złoża mogą zawierać radon. Stężenia radonu w gazie ziemnym zazwyczaj są niższe niż te pochodzące z migracji radonu z gruntu, jednak jego obecność może prowadzić do podwyższenia ogólnego poziomu tego gazu w zamkniętych pomieszczeniach. Zjawisko to może być szczególnie istotne w budynkach, w których gaz ziemny jest intensywnie wykorzystywany, np. do ogrzewania czy gotowania.

5. Dostępne rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężenia radonu wewnątrz budynków

Dobór odpowiedniego rozwiązania technicznego w zakresie ograniczania stężenia radonu powinien być poprzedzony identyfikacją trzech czynników: źródła radonu, wartości stężenia radonu wewnątrz budynku oraz mechanizmów transportu/dróg wnikania radonu do budynku. Skuteczność zastosowanych metod ocenia się na podstawie ostatecznego stężenia radonu w pomieszczeniach. Zasadniczo,

dostępne rozwiązania można podzielić na dwie grupy: te, które zapobiegają przedostawaniu się radonu do budynku lub spowalniają ten proces, oraz te, które służą redukcji jego stężenia wewnątrz budynku. Rozwiązania z pierwszej grupy koncentrują się na eliminacji przyczyn wysokiego stężenia radonu w budynku, podczas gdy druga grupa działań jest ukierunkowana na redukcję skutków przenikania radonu do wnętrza obiektu, a więc na obniżenie jego stężenia.

Zgodnie z wytycznymi WHO [10] stosowane rozwiązania techniczne wymagają spełnienia następujących kryteriów projektowych:

- » **powinny być zdolne do obniżenia stężenia radonu poniżej poziomu referencyjnego, tj. 300 Bq/m³;**
- » **powinny być bezpieczne,**
- » **powinny być trwałe i funkcjonalne przez cały okres użytkowania budynku,**
- » **powinny umożliwić łatwe monitorowanie wydajności,**
- » **powinny być ciche i dyskretne,**
- » **powinny zapewniać niskie koszty instalacji, eksploatacji i konserwacji,**
- » **powinny umożliwiać łatwy montaż dodatkowego wentylatora w przypadku pasywnych systemów SSD.**

5.1 Techniki redukcji stężeń dla nowo planowanych budynków

Z oczywistych względów, wybór technik mających na celu ograniczenie narażenia na radon wewnątrz nowych budynków najlepiej uwzględnić już na etapie projektowania. W tym kontekście istotna jest analiza terenu, na którym ma powstać budynek, aby określić stopień wymaganej ochrony przed radonem. Na podstawie wyników tej analizy dobiera się odpowiednie środki zabezpieczające już na etapie projektowania i budowy budynku.

Istnieją dwa główne sposoby oceny terenu pod kątem zagrożeń radonowych. Pierwsza metoda polega na sprawdzeniu, czy obszar, na którym planowana jest budowa, znajduje się w regionach o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia podwyższonych stężeń radonu. Klasyfikację takich terenów opiera się na pomiarach przeprowadzonych w istniejących budynkach, a wyniki są zazwyczaj uzupełniane danymi geologicznymi. W niektórych krajach, takich jak Wielka Brytania czy Irlandia, opracowuje się raporty i mapy przedstawiające obszary o podwyższonym ryzyku występowania wysokich stężeń radonu (High Radon Areas). Na terenach zidentyfikowanych jako te o podwyższonym ryzyku, w niektórych krajach (Czechy, USA), zaleca się zastosowanie odpowiednich technik budowlanych i zabezpieczeń antyradonowych już na etapie budowy.

Druga metoda jest stosowana, gdy, jak na przykład w Polsce, nie dysponuje się mapą radonową kraju. W tym przypadku rekomenduje się bezpośrednie badania w miejscu planowanej inwestycji. Badania te obejmują pomiar stężenia radonu w powietrzu gruntowym oraz określenie przepuszczalności gruntu. Na podstawie zebranych wyników można ustalić tzw. indeks radonowy (Tabela 2) dla danego terenu, co pozwala na dobranie właściwych środków ochronnych w zależności od przyznanej kategorii.

Tabela 2. Indeks radonowy [13].

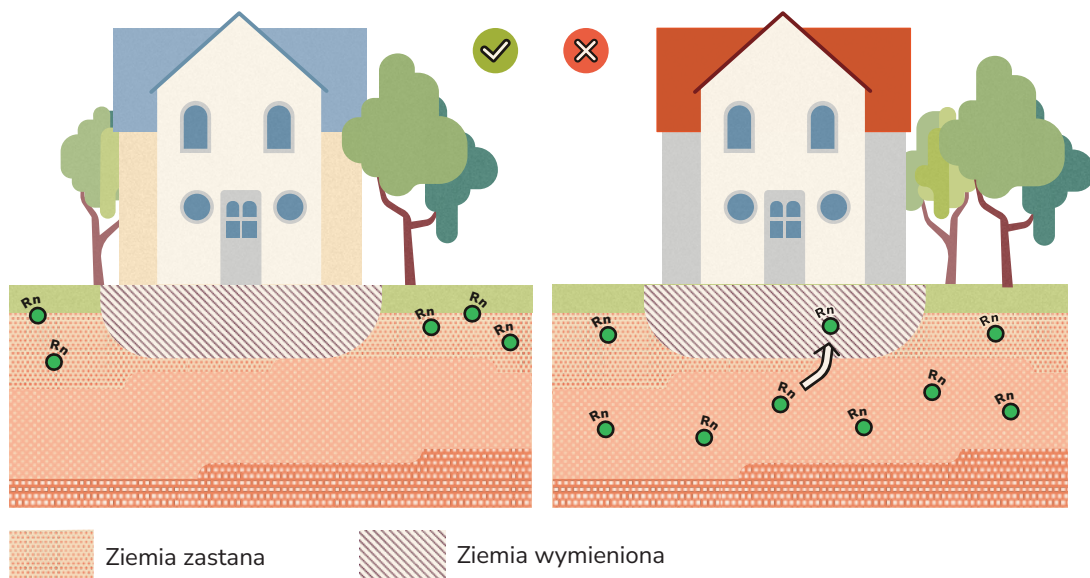
Indeks radonowy (kategoria)	Stężenie radonu w glebie (kBq/m ³)		
Niski	<30	<20	<10
Średni	100-300	20-70	10-30
Wysoki	>100	>70	>30
	Niska przepuszczalność gruntu	Średnia przepuszczalność gruntu	Wysoka przepuszczalność gruntu

Odpowiednia kategoria pociąga za sobą określone działania:

- » niski indeks radonowy - zabudowa mieszkaniowa możliwa bez dodatkowych zabezpieczeń przed radonem przy zapewnieniu szczelności przyłączy instalacyjnych i ciągłości fundamentów,
- » średni indeks radonowy - możliwa zabudowa mieszkaniowa z zastosowaniem dodatkowych technik zabezpieczeń antyradonowych,
- » wysoki indeks radonowy - zabudowa mieszkaniowa możliwa jedynie przy zastosowaniu specjalnych technik zabezpieczeń na etapie zarówno projektu, jak i budowy.

Działania prewencyjne podejmowane na etapie budowy koncentrują się na zapobieganiu przedostawania się radonu z podłoża do wnętrza budynku poprzez uszczelnienie możliwych dróg wnikania radonu do wnętrza budynku i wyrównywanie różnicy ciśnień między podłożem a budynkiem. Do powszechnie stosowanych metod należą mechaniczne bariery antyradonowe, takie jak specjalne folie, membrany i papy uszczelniające. Istotną rolę odgrywa również konstrukcja fundamentów i piwnic.

Rozwiązaniem, które znajduje zastosowanie na etapie planowania budowy, jest usunięcie warstwy gleby o wysokim stężeniu radu (^{226}Ra) spod planowanego budynku i zastąpienie jej ziemią niezawierającą zawartości tego izotopu (Rysunek 14). Grubość usuwanej warstwy zależy od lokalnych warunków geologicznych, jednak zazwyczaj usunięcie warstwy o grubości 1,5-3 metrów pozwala na skuteczne i trwałe zmniejszenie stężenia radonu we wnętrzu planowanego budynku. Kluczowym etapem tego procesu jest przeprowadzenie szczegółowej ekspertyzy geologicznej w celu ustalenia głębokości, na której występuje gleba o wysokiej zawartości radu (^{226}Ra).



Rysunek 14. Wymiana warstwy gleby pod budynkiem.

Usunięcie gleby, bez uprzedniego zbadania jej właściwości i struktury, może przynieść odwrotny efekt. W takich przypadkach istnieje ryzyko, że radon z głębszych warstw gruntu zacznie łatwiej migrować ku powierzchni, co w rezultacie może prowadzić do zwiększenia jego stężenia w budynku.

Istnieje również możliwość wymiany ziemi spod już istniejącego budynku, jednak takie rozwiązanie wiąże się z istotnie wyższymi kosztami. Proces ten jest bardziej skomplikowany, ponieważ wymaga zaawansowanych prac inżynierskich, które muszą być przeprowadzone w sposób minimalizujący ryzyko uszkodzenia fundamentów lub konstrukcji budynku. Ze względu na te trudności, wymiana gruntu w takich przypadkach jest stosowana jedynie w wyjątkowych sytuacjach, gdy inne metody redukcji stężenia radonu okazują się niewystarczające.

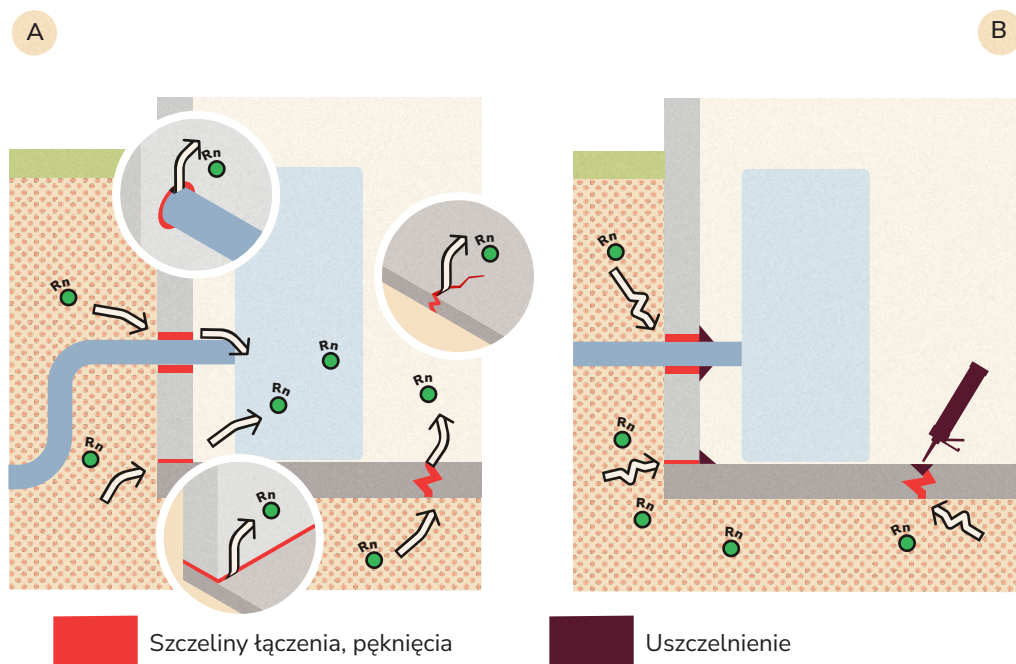
5.2 Techniki redukcji stężeń radonu w istniejących budynkach

5.2.1 Uszczelnienie fundamentów/ścian

Pęknięcia w konstrukcji budynku są zjawiskiem powszechnym i mogą pojawiać się praktycznie w każdej budowlu. W nowych budynkach wynikają one najczęściej z procesu osiadania, podczas którego konstrukcja, pod wpływem własnego ciężaru, stopniowo zagłębia się w grunt. Proces ten może być uzależniony od wielu

czynników, takich jak rodzaj gruntu, na którym posadowiono budynek, wielkość obciążeń, wilgotności gruntu, a także jakości wykonania fundamentów. W starszych budynkach pęknięcia powstają zwykle w wyniku zmian wilgotności i temperatury gruntu, które mogą wpływać na stabilność konstrukcji. Uszczelnianie pęknięć i nieszczelności można przeprowadzić na dwa sposoby.

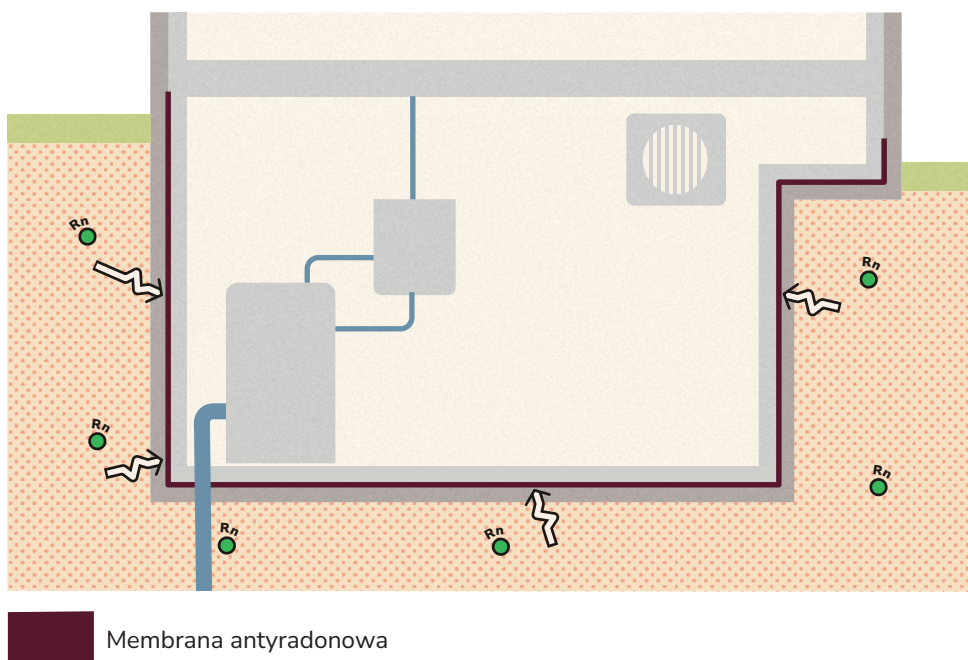
Pierwszy, prostszy i niewymagający zaawansowanej wiedzy technicznej, polega na ręcznym uszczelnianiu widocznych nieszczelności, takich jak połączenia podłogi ze ścianami, nieszczelności przepustów rur i przewodów elektrycznych, czy pęknięć w płytach podłogowych (Rysunek 15). W tym celu stosuje się różnego rodzaju masy uszczelniające, które są łatwo dostępne w sklepach budowlanych. Ważne jest, aby wybrana masa zapewniała hermetyczne uszczelnienie zarówno mokrego, jak i suchego betonu, była odporna na obecność wody, była zdolna do wytrzymywania niewielkich ruchów podłoża oraz aby blokowała przenikanie radonu, tzn. stanowiła barierę antyradonową.



Rysunek 15. Nieszczelności, które można uszczelnić samodzielnie masą uszczelniającą.

Należy jednak pamiętać, że nie wszystkie nieszczelności są widoczne gołym okiem, a z czasem mogą pojawiać się nowe pęknięcia. Z tego powodu metoda ta powinna być traktowana jako uzupełnienie bardziej kompleksowych działań zabezpieczających przed radonem. Dodatkowo, dla zachowania skuteczności tego rozwiązania w dłuższej perspektywie czasu konieczna jest systematyczna kontrola i konserwacja wykonanych uszczelnień.

Drugi, bardziej zaawansowany sposób to wykorzystanie membran/folii antyradonowych. W budownictwie stosuje się materiały do izolacji fundamentów, które stanowią popularne rozwiązanie chroniące budynek na przykład przed wilgocią. Materiały te umieszcza się na powierzchniach mających bezpośredni kontakt z podłożem, takich jak płyty czy ściany fundamentowe. Na polskim rynku dostępnych jest coraz więcej nowoczesnych rozwiązań tego typu, w tym produkty oznaczone jako „antyradonowe”, które dodatkowo chronią przed przenikaniem radonu z gleby do budynku.



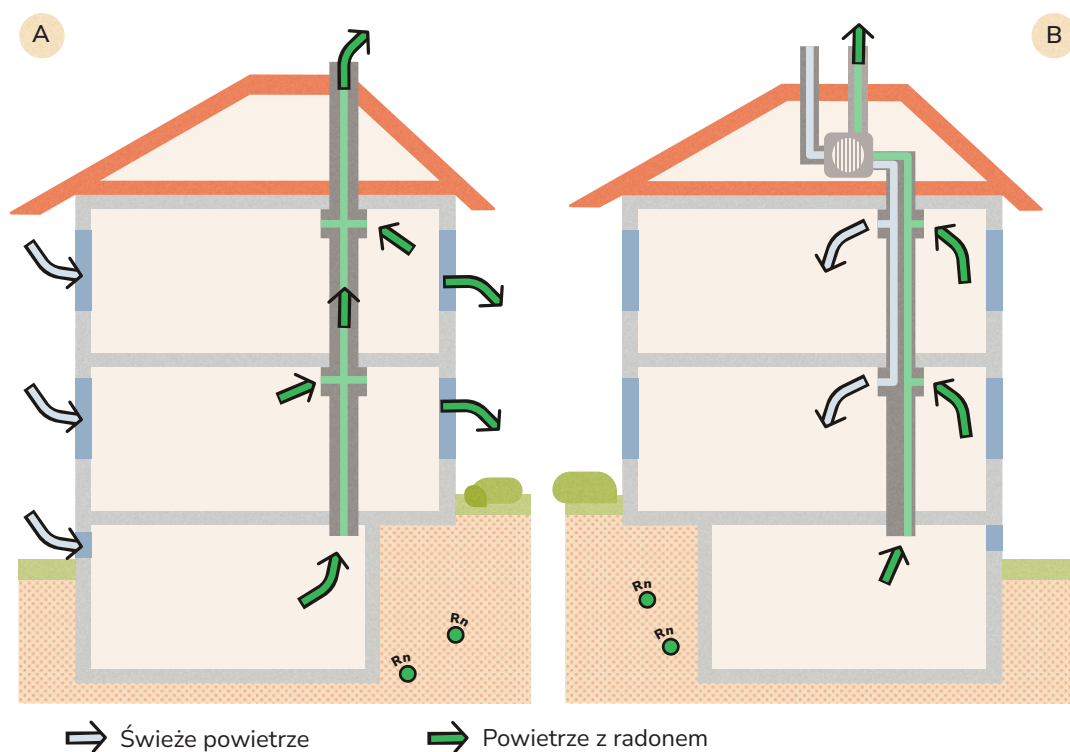
Rysunek 16. Uszczelnienie fundamentów i ścian fundamentowych folią antyradonową.

Materiały izolacyjne występują w dwóch formach: płynnej oraz stałej. W wersji płynnej najczęściej stosuje się specjalistyczne papy bitumiczne lub preparaty uszczelniające, które dzięki swojej konsystencji wnikają w najmniejsze szczeliny, a po utwardzeniu tworzą jednolitą, nieprzepuszczalną barierę. Z kolei materiały

w formie stałej to folie lub membrany, rozwijane z bębna i montowane na powierzchni fundamentów. Przy układaniu folii szczególną uwagę należy zwrócić na szczelność łączeń (Rysunek 16). Nawet niewielka nieszczelność może znacząco obniżyć skuteczność izolacji, doprowadzając do wysokiego stężenia radonu w pomieszczeniu.

Uszczelnianie fundamentów i ścian jest powszechnie stosowaną metodą ograniczającą dostęp radonu do budynku. Typowe współczynniki redukcyjne mieszczą się w przedziale 10–60% [14].

5.2.2 Wentylacja



Rysunek 17. A) Wentylacja naturalna B) Wentylacja mechaniczna.

Zwiększenie częstotliwości wymiany powietrza w budynku to jedna z najprostszych metod redukcji stężenia radonu w pomieszczeniach. Mimo swojej prostoty, metoda ta nie zawsze okazuje się najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem, ze względu na koszty związane z instalacją systemu wentylacyjnego oraz jego codzienną eksploatacją. Warto podkreślić, że jest to sposób który nie usuwa źródła radonu z pomieszczeń. Dlatego też nie wymaga szczególowej wiedzy na temat

konstrukcji fundamentów, charakterystyki geologicznej terenu czy lokalizacji samego źródła radonu. Jednak kluczowe jest zrozumienie, że skuteczność tej metody zależy od jej ciągłego stosowania. W przypadku przerwania lub wyłączenia systemu wentylacji stężenie radonu w pomieszczeniach może gwałtownie wzrosnąć.

Zastosowanie wentylacji mechanicznej lub zwiększenie intensywności wymiany powietrza niesie pewne ograniczenia. Przede wszystkim wiąże się z dodatkowymi kosztami energii, które mogą znacząco obciążać budżet użytkowników. Dodatkowo, działanie systemów wentylacyjnych generuje hałas, co może wpływać na komfort mieszkańców/pracowników.

W związku z powyższym, zwiększenie częstotliwości wymiany powietrza jest efektywnym, ale krótkoterminowym rozwiązaniem. Najlepsze rezultaty można osiągnąć, łącząc tę metodę z innymi działaniami prewencyjnymi, takimi jak odpowiednia izolacja fundamentów czy uszczelnianie punktów kontaktu budynku z gruntem, które pozwalają na eliminację źródła radonu.

Wentylacja w budynku może funkcjonować w dwóch podstawowych trybach: naturalnej, nazywanej także grawitacyjną, oraz mechanicznej (Rysunek 17). Wentylacja naturalna nie wymaga zasilania energią elektryczną, ponieważ opiera się na zjawisku naturalnej konwekcji powietrza. Różnice w gęstości powietrza o różnej temperaturze oraz obecność różnicy ciśnień między wnętrzem budynku a otoczeniem sprawiają, że powietrze samoistnie przemieszcza się przez kanały wentylacyjne, kratki czy nieszczelności.

Wentylacja mechaniczna działa dzięki zastosowaniu wentylatorów zasilanych elektrycznie, które wymuszają przepływ powietrza w kanałach wentylacyjnych. Pozwala to na precyzyjne kontrolowanie intensywności wymiany powietrza oraz kontrolowanie kierunku przepływu powietrza, co jest szczególnie istotne w nowoczesnych budynkach o wysokiej szczelności termicznej. Choć wentylacja mechaniczna wymaga zasilania i jest trudniejsza w instalacji, zapewnia większą efektywność, możliwość filtracji powietrza oraz odzyskiwania ciepła, co przekłada się na lepszy komfort użytkowników.

Wybór odpowiedniego systemu wentylacji zależy od rodzaju budynku, jego przeznaczenia, lokalizacji oraz oczekiwań mieszkańców w zakresie komfortu i efektywności energetycznej.

Poprawnie zaprojektowany i zainstalowany system wentylacji, zarówno grawitacyjnej, jak i mechanicznej, z dużym prawdopodobieństwem przyczyni się do znaczącego obniżenia stężenia radonu w pomieszczeniach. Warto jednak pamiętać, że nawet drobne błędy popełnione podczas instalacji mogą prowadzić do niepożądanych skutków. Jednym z nich jest możliwość rozprzestrzeniania się radonu za pośrednictwem systemu wentylacyjnego do innych części budynku, w tym również do pomieszczeń usytuowanych na wyższych kondygnacjach (Rysunek 17). Dlatego kluczowe jest, aby prace związane z montażem systemu wentylacyjnego były przeprowadzane z najwyższą starannością i zgodnie z obowiązującymi standardami technicznymi.

Wentylacja naturalna/grawitacyjna

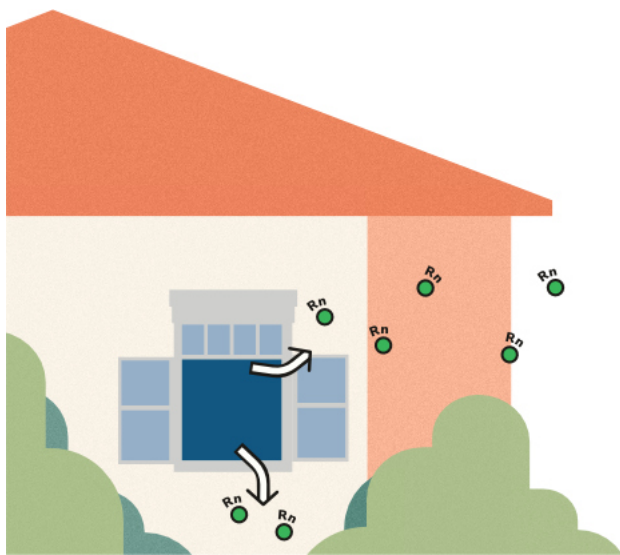
Kluczowymi elementami systemu wentylacji grawitacyjnej są kominy wentylacyjne, nawiewniki w oknach, kratki wentylacyjne, a także konstrukcja okien i drzwi. Funkcjonowanie tego systemu opiera się na naturalnym ruchu powietrza, wynikającym z różnicy temperatur i ciśnień między wnętrzem budynku a otoczeniem. Skuteczność wentylacji grawitacyjnej w dużym stopniu zależy od drożności tych elementów. Gdy okna, kratki wentylacyjne lub nawiewniki zostaną zamknięte, uszczelnione lub oklejone folią, cyrkulacja powietrza ustaje, co prowadzi do znacznego pogorszenia jakości powietrza wewnątrz budynku i wzrost wartości stężenia radonu.

Efektywność wentylacji grawitacyjnej można regulować, sterując otwieraniem i zamykaniem otworów nawiewnych. Dodawanie nawiewników świeżego powietrza lub ich otwieranie zwiększa współczynnik wymiany powietrza. Działanie to pozwala również zmniejszyć podciśnienie w budynku, co z kolei przyczynia się do wyrównania temperatur pomiędzy wnętrzem a otoczeniem. Dzięki temu można uniknąć niekontrolowanego zasysania powietrza z niepożądanych źródeł, takich jak piwnice czy miejsca o wysokim stężeniu wilgoci lub zanieczyszczeń. Z drugiej strony stanowi to pewien problem zimą, kiedy ważne jest utrzymanie ciepła w budynku. Może to zwiększyć koszty związane z ogrzewaniem budynku.

Wentylacja grawitacyjna ma istotną zaletę w postaci braku konieczności zasilania energią elektryczną, co w tym kontekście czyni ją prostym i ekonomicznym rozwiązaniem. Niemniej jednak jej efektywność jest bardzo zmienna i zależy od czynników środowiskowych, takich jak temperatura zewnętrzna, różnice ciśnień czy siła wiatru. W okresie letnim, gdy różnica temperatur między wnętrzem a otoczeniem jest niewielka, wentylacja grawitacyjna może działać znacznie mniej efek-

tywnie, co wymaga zastosowania dodatkowych środków, aby zmniejszyć wartość stężenia radonu w budynku.

Wydajność wentylacji grawitacyjnej uzależniona jest również od liczby i wielkości otworów wentylacyjnych. Okna i drzwi również można zaliczyć do szeroko pojętego systemu wentylacji grawitacyjnej. Dlatego otwieranie okien w celu przewietrzenia pomieszczeń jest bardzo skuteczną, chociaż doraźną, metodą na obniżenie stężenia radonu w pomieszczeniu (Rysunek 18). Dzięki tej prostej czynności można szybko obniżyć poziom tego szkodliwego gazu, jednak rozwiązanie to ma swoje istotne ograniczenia.



Rysunek 18. Wietrzenie pomieszczeń.

Największym minusem wietrzenia jest jednocześnie wyrównanie temperatury powietrza w pomieszczeniu z temperaturą na zewnątrz, co w okresie zimowym prowadzi do znacznych strat ciepła. Skutkiem tego może być nie tylko dyskomfort termiczny, ale także zwiększenie kosztów związanych z ogrzewaniem. Warto zatem uwzględnić wietrzenie jako doraźny środek, stosowany w połączeniu z innymi rozwiązaniami.

Wentylacja mechaniczna wywiewna

Innym rozwiązaniem, które skutecznie obniża stężenie radonu w budynku, jest zastosowanie wentylacji mechanicznej. Umożliwia ona precyzyjną regulację szybkości wymiany powietrza, co pozwala dostosować liczbę wymian powietrza do

poziomu stężenia radonu. Im wyższe stężenie radonu w pomieszczeniach, tym bardziej intensywna wymiana powietrza jest potrzebna, aby skutecznie je obniżyć.

Wentylacja mechaniczna działa wykorzystując wentylatory, które wymuszają przepływ powietrza w kanałach wentylacyjnych. Dzięki tym urządzeniom możliwe jest precyzyjne kontrolowanie ilości powietrza wymienianego w określonym czasie. Dodatkowo, generowane przez wentylatory podciśnienie pozwala na efektywne przemieszczanie powietrza przez kanały wentylacyjne, niezależnie od ich długości czy kształtu, a także w różnych kierunkach. Co ważne, warunki zewnętrzne, takie jak temperatura, ciśnienie atmosferyczne czy siła wiatru, nie wpływają na proces wentylacji, eliminując w ten sposób główną wadę wentylacji grawitacyjnej, która jest zależna od zmiennych warunków pogodowych.

Jednakże, wentylacja mechaniczna może wiązać się z pewnymi problemami, jak na przykład powodować zwiększone podciśnienie w budynku, które może prowadzić do wzrostu tzw. efektu kominowego. Warto również pamiętać, że przy instalowaniu wentylacji mechanicznej należy zadbać, aby wilgotne powietrze nie przedostawało się do warstw konstrukcyjnych budynku, ponieważ może to prowadzić do problemów z kondensacją, wilgocią i rozwojem pleśni.

Mimo wielu zalet, wentylacja mechaniczna wiąże się z dodatkowymi kosztami operacyjnymi, w tym zużyciem energii elektrycznej i ewentualnym hałasem generowanym przez wentylatory. Zwiększenie intensywności wymiany powietrza w przypadku wysokiego stężenia radonu prowadzi do wyższego zużycia energii oraz głośniejszego działania systemu wentylacyjnego.

Pomimo tych kosztów, wentylacja mechaniczna jest skuteczną metodą zapewniania odpowiedniej jakości powietrza w budynkach, szczególnie w przypadku problemów z wysokim stężeniem radonu.

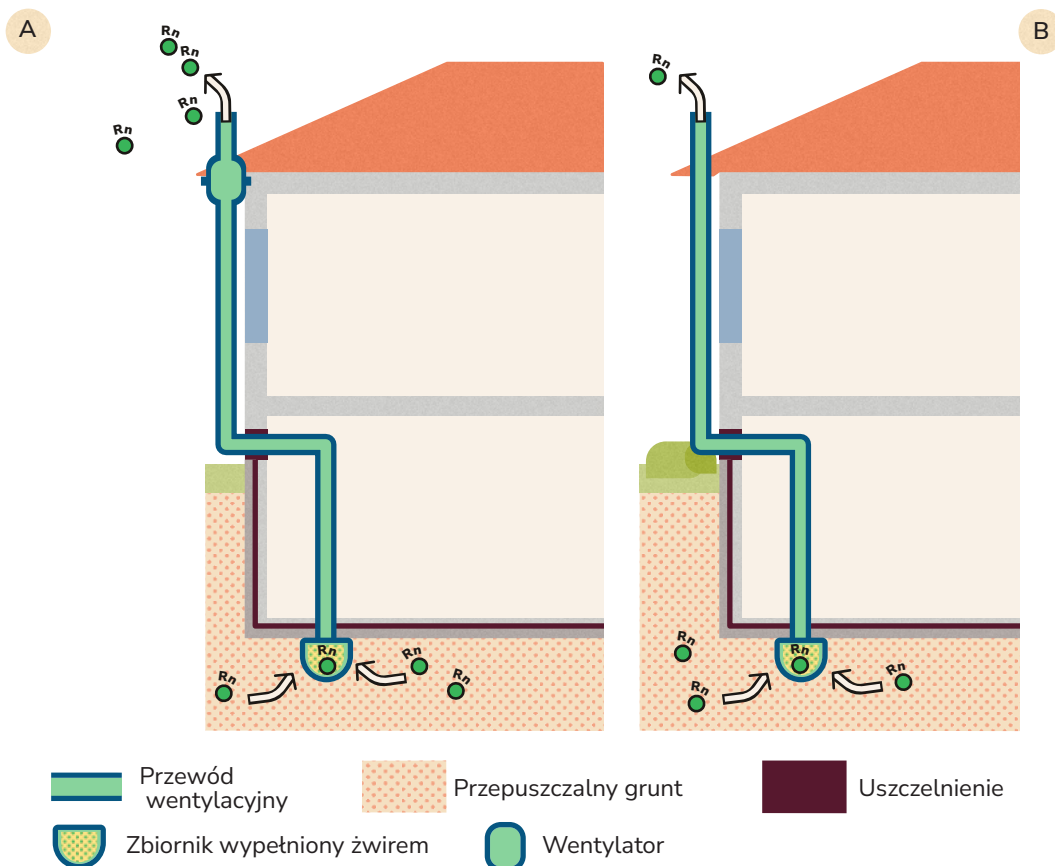
5.3 Rozwiązania techniczne służące ograniczeniu stężeń radonu instalowane na zewnątrz budynku

Rozwiązania instalowane na zewnątrz budynku dotyczą najczęściej, tzw. wentylacji gruntu, czyli usuwanie radonu z powietrza gruntowego. Są to najlepsze rozwiązania w przypadku, kiedy źródłem radonu jest wysokie stężenie radu (Ra^{226}) (izotopu macierzystego radonu) w gruncie znajdującym się pod budynkiem.

5.3.1 System depresuryzacji podłogowej SSD (ang. Sub-slab depressurization) pasywny + aktywny

System depresuryzacji podpodłogowej (SSD) to jedna z najbardziej efektywnych i powszechnie stosowanych metod redukcji stężenia radonu w powietrzu wewnątrz budynku. Metoda ta cieszy się dużą popularnością na całym świecie ze względu na swoją skuteczność, relatywnie niskie koszty użytkowania oraz prostotę montażu.

Podstawowy system SSD, jak przedstawiono na Rysunku 19, składa się z kilku kluczowych elementów: niewielkiego zbiornika (o objętości ok. 10-15 dm³), rury wentylacyjnej oraz wentylatora. Zbiornik jest instalowany pod płytą podłogową i wypełniany grubym żwirem, który umożliwia swobodny przepływ powietrza. Wentylator wymusza odsysanie powietrza z przestrzeni podpodłogowej przez rurę wentylacyjną, co skutecznie zmniejsza stężenie radonu. Istnieją również systemy SSD, które nie wykorzystują wentylatora, jednak ich efektywność jest znacznie mniejsza, szczególnie w przypadku wysokiego stężenia radonu.



Rysunek 19. System depresuryzacji podpodłogowej (SSD) A) aktywny B) pasywny.

Zastosowanie SSD wpływa na obniżenie poziomu stężenia radonu wewnątrz budynku dwoma sposobami: po pierwsze, rozcieńcza stężenie radonu pod płytą podłogową, a po drugie, tworzy ujemną różnicę ciśnień między obszarem podpodłogowym a wnętrzem budynku. Ta różnica ciśnień skutecznie ogranicza przepływ radonu z gruntu do wewnętrznych pomieszczeń mieszkalnych.

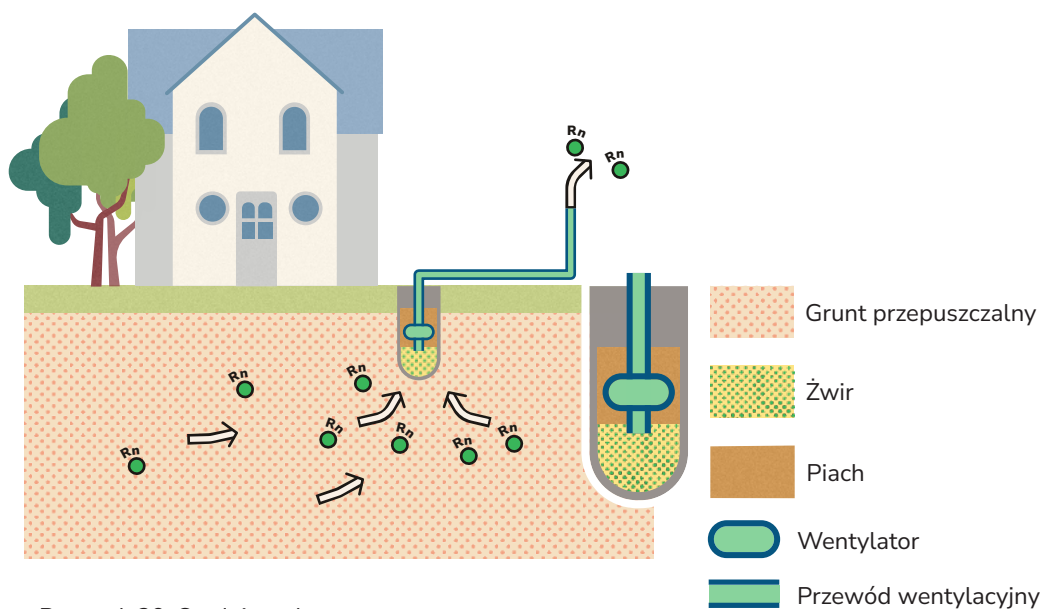
W budynkach z fundamentami podzielonymi na oddzielne sekcje, np. przez ściany nośne, może być konieczne zastosowanie większej liczby zbiorników SSD, aby zapewnić skuteczność systemu w całym budynku.

Najlepsze rezultaty osiąga się przy zastosowaniu SSD na terenach z przepuszczalnymi glebami, gdzie radon łatwo migruje przez warstwy gruntu. System ten jest nie tylko prosty w instalacji, ale również charakteryzuje się niskimi kosztami eksploatacji, przez co jest praktycznym rozwiązaniem w długoterminowym obniżaniu stężenia radonu w budynku.

5.3.2 Studnia radonowa

Studnia radonowa to instalacja montowana na zewnątrz budynku, która pozwala na skuteczną redukcję stężenia radonu w powietrzu gruntowym. Studnia radonowa to otwór wykopany w ziemi, którego dno wypełnione jest warstwą żwiru. W żwirze umieszcza się przewód wentylacyjny wyposażony w wentylator, który aktywnie odsysa powietrze zawierające radon. Na wierzchu warstwy żwiru układa się warstwę piasku, która pełni funkcję zabezpieczającą. Działanie studni radonowej ilustruje Rysunek 20.

Zastosowanie tego rozwiązania skutecznie redukuje stężenie radonu w powietrzu gruntowym zarówno pod fundamentami budynku, jak i w jego najbliższym otoczeniu. Dzięki temu zmniejsza się ilość radonu migrującego z gruntu do wnętrza budynku, co znacząco poprawia jakość powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych/pracy. Co więcej, pojedyncza studnia radonowa może obniżyć stężenie radonu w wielu budynkach znajdujących się w odległości do 20–30 metrów od miejsca instalacji, co czyni ją rozwiązaniem efektywnym także w kontekście zabudowy sąsiedniej.



Rysunek 20. Studnia radonowa.

Studnia radonowa charakteryzuje się wysoką skutecznością redukcji stężenia radonu przy jednocześnie niskich kosztach eksploatacyjnych. System zużywa niewielką ilość energii elektrycznej, co sprawia, że jest opłacalny w długoterminowym użytkowaniu. Niemniej jednak, skuteczność tego rozwiązania jest uzależniona od właściwości geologicznych terenu. Studnie radonowe najlepiej sprawdzają

się na obszarach z gruntami o dużej przepuszczalności, gdzie radon łatwo migruje przez warstwy ziemi. W gruntach o niskiej przepuszczalności ich efektywność może być ograniczona, dlatego przed instalacją zaleca się ocenę warunków geotechnicznych terenu.

6. Dostępne środki ochrony służące zmniejszeniu narażenia pracowników na radon

W przypadku, kiedy zastosowanie środków zapobiegawczych lub modyfikacji budynku nie jest możliwe do dyspozycji pozostają środki ochrony indywidualnej, lub inne mniej inwazyjne metody. Mogą być one również pomocne w etapie przejściowym i być traktowane jako rozwiązania doraźne w czasie oczekiwania na realizację zaplanowanych działań. Metody te nie wpływają znacznie na obniżenie poziomu stężenia radonu w powietrzu, ale mogą zmniejszyć narażenie osób przybywających w takim pomieszczeniu, głównie przez zmniejszenie stężenia krótkożyciowych pochodnych radonu.

W przypadku pracy w pomieszczeniach biurowych najłatwiejszym i jednocześnie najmniej uciążliwym z przedstawionych środków ochrony pracowników jest wykorzystanie oczyszczaczy powietrza.

Oczyszczacze mogą skutecznie odfiltrowywać krótkożyciowe pochodne radonu, które, jak wcześniej wspomniano, stanowią największe zagrożenie dla zdrowia. Mimo że nie są one skuteczne w obniżaniu stężenia radonu [15], mogą w znacznym stopniu zmniejszać dawkę efektywną otrzymywaną przez osoby przebywające w pomieszczeniu [16][17].

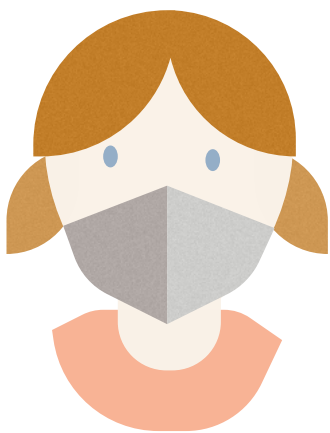
O skuteczności oczyszczaczy decyduje przede wszystkim typ zamontowanego w nich filtru i tryb pracy. Pochodne radonu przyczepiają się do aerozoli obecnych w środowisku, tworząc klastry lub cząsteczki o średnicy od 1 nm do nawet

10 000 nm. Dlatego warto wybrać oczyszczacz wyposażony w filtry, które są w stanie wychwytywać aerozole o szerokim zakresie średnic.

W przypadku wykorzystywania oczyszczacza powietrza do obniżania narażenia pracowników na radon należy pamiętać o tym, że powinny one pracować w trybie ciągłym. Ustawienie trybu automatycznego może spowodować przejściem oczyszczacza w tryb uśpienia, w szczególności w przypadku braku innych aerozoli w powietrzu, ponieważ oczyszczacze nie są w stanie wykrywać radonu oraz jego pochodnych.

Najbardziej efektywny jest ustawienie oczyszczacza na maksymalną moc filtrowania, ale niestety wiąże się to z większym zużyciem energii elektrycznej, filtrów oraz hałasem.

Ważną kwestią jest wybór oczyszczacza odpowiedniego do kubatury pomieszczenia, w którym będzie on używany.



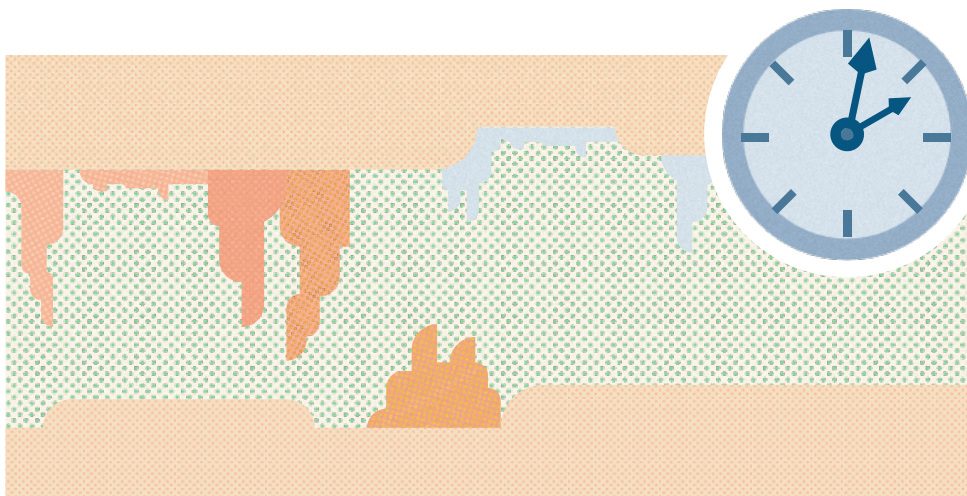
Rysunek 21. Maski ochronne.

Innym środkiem ochrony przed radonem jest stosowanie masek ochronnych (Rysunek 21). Podobnie jak oczyszczacze są one w stanie odfiltrować znaczną część pochodnych radonu, dzięki czemu obniżają dawkę skuteczną otrzymaną przez pracownika.

Zdolności filtracyjne zależą w dużej mierze od typu filtra oraz rozkładu średnic aerozoli w otoczeniu, podobnie jak w przypadku oczyszczaczy powietrza. Najbardziej skuteczne są maski o wysokim stopniu filtracji, jak na przykład o klasie filtracji FFP3 lub z zamontowanym filtrem węglowym.

Na skuteczność stosowania masek ochronnych, poza typem filtracji, wpływ ma również stopień dopasowania maski do twarzy – jej szczelności [18] oraz stopień zużycia.

Brak możliwości zapewnienia odpowiedniej wentylacji w miejscach o wysokim stężeniu radonu może stanowić poważny problem, szczególnie w podziemnych trasach turystycznych. Dotyczy to zwłaszcza jaskiń (Rysunek 22), gdzie wprowadzenie dodatkowej wentylacji mogłoby zakłócić naturalny mikroklimat, który jest istotnym elementem ekosystemu tych obszarów. W takim przypadku należy dostosowywać czas pracy do panujących warunków. Rozwiązaniem może być wprowadzenie pracy zmianowej, która pozwoliłaby na ograniczenie czasu, jaki poszczególne pracownicy spędzają w strefach o podwyższonym stężeniu radonu, skracając maksymalnie czas ekspozycji dla każdej osoby w skali roku.



Rysunek 22. Ograniczenie czasu pracy w strefach o podwyższonym stężeniu radonu.

7. Zestawienie środków ograniczających stężenie radonu [19]

Tabela 3 Zestawienie środków ograniczających stężenie radonu.

Typ rozwiązania		Zmniejszenie stężenia w budynku		Efektywność
		Radon	Pochodne radonu	
rozwiązania budowlane - na zewnątrz budynku				
system depresuryzacji podłogowej SSD (ang. Sub-slab depressurization)	system pasywny	tak	tak	50-95 %
	system aktywny	tak	tak	system pasywny stosowany przy stężeniu radonu w wysokości kilkuset Bq/m3, powyżej tej wartości zaleca się system aktywny.
Studnia radonowa		tak	tak	80-90 % (wyłącznie przy przepuszczalnych glebach)

Typ rozwiązania		Zmniejszenie stężenia w budynku		Efektywność
		Radon	Pochodne radonu	
rozwiązania budowlane - wewnątrz budynku				
Uszczelnienie dróg wnikania radonu do budynku)	membrany/folie antyradonowe	tak	tak	35-70 %
	papy antyradonowe	tak	tak	
	uszczelnienie dróg przenikania radonu do budynku	tak	tak	10-60 %
Wentylacja	wentylacja mechaniczna wywiewna	tak	tak	10-60 % W zależności od siły wywiewu
	wentylacja naturalna/grawitacyjna	tak	tak	10-50 % W budynkach o podwyższonym stężeniu radonu (powyżej poziomu odniesienia 300 Bq/m3) wyłącznie w połączeniu z innymi metodami obniżającymi stężenie radonu
Farby		tak	tak	20-70 % zależy od liczby warstw farby oraz zawartości radu i toru w materiale budowlanym.

Typ rozwiązania	Zmniejszenie stężenia w budynku		Efektywność
	Radon	Pochodne radonu	
środki ochrony indywidualnej i inne środki doraźne - wewnątrz budynku			
Oczyszczacze powietrza	nie	tak	zależy od kubatury pomieszczenia oraz wysokości stężenia radonu.
Maski ochronne	nie	tak	zależy od rodzaju maski i wysokości stężenia radonu
Skrócony czas pracy	nie	nie	zależy od wysokości stężenia radonu.
Wietrzenie pomieszczeń	tak	tak	Zależy od szybkości wymiany powietrza

8. Podsumowanie

Zabezpieczenie budynków przed wysokimi stężeniami radonu jest kluczowym działaniem na rzecz ochrony zdrowia osób korzystających z tych przestrzeni. Radon, będący gazem promieniotwórczym, stanowi poważne zagrożenie, szczególnie w przypadku długotrwałego narażenia na jego wysokie stężenia, co może prowadzić do rozwoju nowotworów płuc. Aby skutecznie chronić budynek, a tym samym przebywających w nim ludzi, przed radonem, niezbędnym krokiem jest przeprowadzenie odpowiednich badań, które pozwalają ocenić aktualne stężenie radonu wewnątrz budynku oraz zidentyfikować drogi jego przedostawania się do wnętrza. Wyniki takich analiz stanowią podstawę do opracowania skutecznych działań prewencyjnych.

Istnieje wiele metod zapobiegania przenikaniu radonu do budynku, a ich wybór zależy od konstrukcji obiektu, jego lokalizacji, budowy geologicznej terenu oraz innych specyficznych uwarunkowań. Do najczęściej stosowanych rozwiązań należą poprawa wentylacji, która zwiększa wymianę powietrza i zmniejsza stężenie radonu, izolacja fundamentów poprzez uszczelnianie szczelin i pęknięć, instalacja systemów odsysania radonu spod fundamentów na zewnątrz oraz montaż

specjalnych membran przeciwradonowych (antyradonowych) w trakcie budowy lub remontu budynku. W praktyce najlepsze efekty przynosi jednocześnie zastosowanie kilku metod, co pozwala na kompleksowe i skuteczne zabezpieczenie budynku.

Warto skorzystać z pomocy ekspertów, którzy dzięki swojej wiedzy i doświadczeniu mogą zaproponować najskuteczniejsze środki ochrony przed radonem. Inwestycja w takie działania przekłada się na znaczną poprawę bezpieczeństwa i zdrowia użytkowników budynku, redukując ryzyko związane z długotrwałym narażeniem na radon.

9. Bibliografia

[1] Kalina Mamont-Cieśla, Radon – promieniotwórczy gaz w środowisku człowieka, Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

[2] Państwowa Agencja Atomistyki [PAA]. 2024. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz ocena stanu bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej w Polsce w 2023 roku, PAA, Warszawa.

[3] Marsh, J. W., Laurier, D., Tirmarche, M. 2017. Radon Dosimetry for Workers: ICRP's Approach. Radiation Protection Dosimetry. 177 (4), 466-474

[4] Council Directive. 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.

[5] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. Dz.U. 2001 nr 3 poz. 18.

[6] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia. Dz.U. 2020 poz. 1139.

[7] Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. 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. M.P. 2021 poz. 169

[8] Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach państwowego monitoringu środowiska w latach 2020-2022, Zadanie 3. Raport Roczny z trzeciego etapu pracy; K. Isajenko, B. Piotrowska, O. Stawarz, K. Wojtkowski.

[9] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, Dz.U. 2017 poz. 2294

[10] WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva:

[11] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2020 r. w sprawie materiałów budowlanych, w przypadku których oznacza się stężenie promieniotwórcze izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-232, wymagań dotyczących dokonywania tych oznaczeń oraz wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego, o której przekroczeniu informuje się właściwe organy. Dz.U. 2021 poz. 33

[12] Environmental risk assessment of radon from ceramic tiles. A.F. Maged, L.Z. Ismail and N.L.A. Moussa <https://doi.org/10.1051/radiopro/2012011> Radioprotection 2012 Vol. 47, n° 3, pages 403 à 411

[13] Matěj Neznal, Martin Neznal, Reliability Of The New Method For Assessing The Radon Risk – Gas Permeability Classification, Radon v.o.s. corp. Novákových 6, 180 00 Praha 8, Czech Republic

[14] Holmgren, O., Arvela, H., 2012, Assessment of current techniques used for reduction of indoor radon concentration in existing and new houses in European countries, ISBN 978-952-478-681-2

[15] Lowe, S., Pettenato, R., 2000, Reduction of Indoor Radon by Air Cleaning—Case Study, J. Environ. Eng. 2000.126:1125-1130

[16] Yasuoka, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S., Takahashi, H., Sorimachi, A., Shinogi, M., 2008, Radon mitigation using an air cleaner, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 279, No.3 (2009) 885

[17] Iwaoka, K., Tokonami, S., Ishikawa, T., Yonehara, H., 2012, Mitigation effects of radon decay products by air cleaner, J Radioanal Nucl Chem (2013) 295:639–642, DOI 10.1007/s10967-012-1813-z

[18] Hinrichs, A., Fournier, C., Kraft, G., Maier, A. 2022. Radon Progeny Adsorption on Facial Masks. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 11337 <https://doi.org/10.3390/ijerph191811337>

[19] https://www.clor.waw.pl/images/pliki/Dozymetria_Radonu/radon_baza_rozwiza_zapobiegawczych.pdf

10. Spis ilustracji

Rysunek 1. Szereg uranowy.	5
Tabela 1. Produkty rozpadu radonu [1].	6
Rysunek 2. Udział różnych źródeł promieniowania jonizującego w średniej rocznej dawce skutecznej [2].	7
Rysunek 3. Źródła promieniowania jonizującego.	8
Rysunek 4. Powiaty wskazane w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia (oznaczone kolorem zielonym)[6].	11
Rysunek. 5 Obowiązujące przepisy, schemat postępowania.	13
Rysunek 6. Kategorie miejsc pracy, w których występuje wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia poziomu odniesienia 300 Bq/m ³ .	14
Rysunek 7. Rozkład stężenia ²²⁶ Ra w powierzchniowej warstwie gleby na obszarze Polski [8].	15
Rysunek 8. Przepuszczalność gruntu.	16
Rysunek 9. Przedostawanie się radonu do wnętrza budynku.	17
Rysunek 10. Intensywność efektu kominowego w zależności od pory roku.	19
Rysunek 11. Drogi przenikania radonu do wnętrza budynku.	20
Rysunek 12. Woda źródłem radonu w budynku. A) ujęcie własne B) ujęcie miejskie.	21
Rysunek 13. Materiały budowlane jako źródło radonu.	22
Tabela 2. Indeks radonowy [13].	24
Rysunek 14. Wymiana warstwy gleby pod budynkiem.	26
Rysunek 15. Nieszczelności, które można uszczelnić samodzielnie masą uszczelniającą.	27
Rysunek 16. Uszczelnienie fundamentów i ścian fundamentowych folią antyradonową.	28
Rysunek 17. A) Wentylacja naturalna B) Wentylacja mechaniczna.	29

Rysunek 18. Wietrzenie pomieszczeń.	32
Rysunek 19. System depresuryzacji podpodłogowej (SSD) A) aktywny B) pasywny.	35
Rysunek 20. Studnia radonowa.	36
Rysunek 21. Maski ochronne.	38
Rysunek 22. Ograniczenie czasu pracy w strefach o podwyższonym stężeniu radonu.	39
Tabela 3 Zestawienie środków ograniczających stężenie radonu.	40