

MATERIAŁ OPRACOWANY NA POTRZEBY KRAJOWEGO PLANU DZIAŁANIA  
W PRZYPADKU DŁUGOTRWAŁYCH ZAGROŻEŃ WYNIKAJĄCYCH Z NARAŻENIA  
NA RADON W BUDYNKACH PRZEZNACZONYCH NA POBYT LUDZI ORAZ  
W MIEJSCACH PRACY (MON. POL. Z 12 LUTEGO 2021, POZ.169)

Raport został opracowany w ramach zadań badawczych prowadzonych przez Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego PZH – Państwowy Instytut Badawczy finansowanych przez Ministra Zdrowia na podstawie umowy nr NIZP PZH-PIB/2021/1094/1056, ujętych w zadaniu w zadaniu 9/2021: „Opracowanie i realizacja programów w zakresie profilaktyki pierwotnej i wtórnej oraz promocji zdrowia” oraz w zadaniu nr 5/2022: „Popularyzacja wiedzy i informowanie społeczeństwa o aktualnej sytuacji epidemiologicznej chorób i zakażeń oraz sytuacji zdrowotnej obywateli, a także popularyzacja wiedzy i zachowań sprzyjających zdrowiu w zakresie profilaktyki chorób, prawidłowego odżywiania oraz prozdrowotnego stylu życia”.

**AUTORZY:**

DR HAB. MAŁGORZATA DOBRZYŃSKA, PROF. NIZP PZH – PIB  
DR ANETA GAJOWIK  
MGR KAMIL WIEPRZOWSKI

## Spis treści

Pochodzenie i występowanie radonu .....	3
Wpływ radonu na zdrowie .....	5
Radon a palenie tytoniu .....	8
Tereny, na których spodziewane jest podwyższone stężenie radonu w powietrzu pomieszczeń .....	10
Przenikanie radonu do wnętrza budynków .....	12
Dostępne środki techniczne oraz zachowania prozdrowotne służące ograniczeniu stężeń radonu w pomieszczeniach i jego niekorzystnemu wpływowi na zdrowie .....	15
<i>Piśmiennictwo</i> .....	18

## Pochodzenie i występowanie radonu

W skorupie ziemskiej występują naturalnie pierwiastki promieniotwórcze. Promieniotwórczość naturalna powstaje na drodze rozpadów jąder atomowych naturalnych pierwiastków radioaktywnych obecnych w glebie, skałach, powietrzu i wodzie. Jądra atomowe samorzutnie rozpadają się emitując przy tym cząstki  $\alpha$  lub  $\beta$  albo promienie  $\gamma$ . Naturalne pierwiastki radioaktywne obecne są w minerałach, przyswajanych przez rośliny i zwierzęta oraz używanych jako materiały konstrukcyjne. Syntetyzowane są w atmosferze skąd przenikają do hydrosfery wskutek reakcji składników atmosfery z promieniowaniem kosmicznym. Ponadto, przenikają do środowiska wskutek działalności przemysłowej człowieka.

Szeregi promieniotwórcze to ciągi radionuklidów (radionuklid – jądro pierwiastka promieniotwórczego) powstających jeden z drugiego w wyniku naturalnych, spontanicznych przemian jądrowych  $\alpha$  i  $\beta$ , kolejnych rozpadów promieniotwórczych. Szereg kończy się nuklidem stabilnym. W przyrodzie istnieją szeregi uranowo-radowy, torowy i uranowo-aktynowy. Te trzy szeregi składają się z 43 nuklidów promieniotwórczych (izotopów) będącymi odmianami 12 pierwiastków chemicznych. Wśród nich jest 11 metali ciężkich (uran, rad, protaktyn, tor, polon, ołów, bizmut, aktyn, tal, astat, frans), a jeden (radon) jest gazem. Jednym z produktów rozpadu promieniotwórczego **uranu ( $^{238}\text{U}$ )**, jest odkryty przez laureatkę Nagrody Nobla Marię Skłodowską-Curie promieniotwórczy **rad ( $^{226}\text{Ra}$ )**, którego produktem rozpadu jest **radon (Rn)**.

Radon został odkryty w 1900 roku przez Fridricha Ernsta Dorna. Początkowo nazywany był emanacją. Dopiero w 1923 roku Międzynarodowy Kongres Nauki o Promieniotwórczości nadał mu obecną nazwę. **Radon** powstający z rozpadu radu występuje w środowisku naturalnie **emituje głównie promieniowanie  $\alpha$  i w mniejszym stopniu  $\beta$** . W związku z tym, że jest gazem, może wydostać się z skorupy ziemskiej do atmosfery wchodząc w skład powietrza atmosferycznego. Radon rozpada się tworząc tak zwany szereg krótkożyciowych, również promieniotwórczych pochodnych, do których należą m.in. izotopy polonu, bizmutu i ołowiu. Produkty rozpadu radonu, które są ciałami stałymi, łatwo przyłączają się do

aerozoli istniejących w powietrzu i w wyniku oddychania dostają się do płuc. Stąd wynika potencjalne zagrożenie dla zdrowia człowieka.

Najczęściej występującym w przyrodzie izotopem radonu jest  $^{222}\text{Ra}$ . Izotopy to odmienne postacie pierwiastków chemicznych, posiadające tę samą liczbę atomową (liczba protonów jądrze), ale inną liczbę masową (łącznie liczba protonów i neutronów w jądrze). Radon i jego krótkożyciowe produkty rozpadu, będące reaktywnymi izotopami metali ciężkich, odpowiadają za **niemal połowę dawki promieniowania jonizującego** otrzymywaną przez mieszkańców Polski od źródeł naturalnych. **Roczna całkowita dawka skuteczna promieniowania jonizującego**, która określa stopień narażenia całego ciała na promieniowanie nawet przy napromieniowaniu tylko niektórych partii ciała, otrzymana przez statystycznego mieszkańca Polski **w 2020 roku** wynosiła **3,96 mSv**. Wielkość dawki utrzymuje się na zbliżonym poziomie przez kilka ostatnich lat. **Narażenie od źródeł naturalnych stanowi 61,9% całkowitej dawki skutecznej** i wynosi **ok. 2,45 mSv/rok**. Największy udział w tym narażeniu ma **radon i produkty jego rozpadu**, od których statystyczny mieszkaniec Polski otrzymuje dawkę wynoszącą **ok. 1,20 mSv/rok**.

Radon jest gazem bezbarwnym, bezwonny, pozbawionym smaku, niepalnym, jest ośmiokrotnie cięższy od powietrza. Rozpuszcza się w wodzie oraz w rozpuszczalnikach organicznych, świeci w ciemności i jest prawie całkowicie obojętny chemicznie. Najlepiej rozpuszcza się w zimnej wodzie, jego rozpuszczalność spada wraz ze wzrostem temperatury.

Emisja radonu uzależniona jest od budowy geologicznej. Na podstawie typu podłoża można spodziewać się podwyższonego stężenia tego gazu. Podwyższonego stężenia radonu można spodziewać się tam gdzie występuje uran, rad lub tor, a zwłaszcza w regionach, gdzie występują granity, zmetamorfizowane skały magmowe oraz łupki, w których występują złoża uranu. Dlatego, w Polsce podwyższone stężenie radonu występuje w Sudetach, gdzie występują złoża uranu i gdzie do lat 70-tych XX wieku zlokalizowane były kopalnie tego surowca. Typowa wartość aktywności właściwej radu w przypowierzchniowej warstwie skorupy ziemskiej wynosi około 35 Bq/kg, natomiast w Polsce kształtuje się w zakresie 5 – 120 Bq/kg, a średnia wartość wynosi ok. 26 Bq/kg.

**Średnie stężenie  $^{222}\text{Rn}$  w powietrzu atmosferycznym w Polsce wynosi ok. 10 Bq/m<sup>3</sup>** i różni się w zależności od obszaru kraju. Przykładowo wynosi, w Kowarach ok. 30 Bq/m<sup>3</sup>, w Świeradowie Zdroju ok. 24,1 Bq/m<sup>3</sup>,

w Karpaczu ok.  $8,7 \text{ Bq/m}^3$ , w Warszawie ok.  $2,7 \text{ Bq/m}^3$ . Na podstawie wyników dotychczasowych badań można przypuszczać, że obszary podwyższonego ryzyka obejmują 10% obszaru kraju, gdzie stężenie radonu w gruncie przekracza  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Są to regiony południowe.

## Wpływ radonu na zdrowie

Od 2015 roku z inicjatywy *Europejskiego Stowarzyszenia Radonowego (European Radon Association)* w dniu urodzin Marii Skłodowskiej-Curie (7 listopada) obchodzony jest *Europejski Dzień Radonu*. Celem Europejskiego Dnia Radonu jest **zwiększenie świadomości społeczeństwa na temat występowania radonu i związanych z tym konsekwencji zdrowotnych**.

**Radon dostaje się do organizmu człowieka głównie wraz z wdychanym powietrzem atmosferycznym.** Wdychana dawka tego pierwiastka zależy między innymi od jego stężenia w powietrzu, częstości oddechów, wentylacji płuc, czyli objętości powietrza przepływającej przez płuca w jednostce czasu, powierzchni wymiany gazowej w płucach i głębokości wniknięcia do płuc promieniotwórczych cząstek. Sam radon, jako gaz szlachetny nie stanowi dużego zagrożenia, gdyż nie wchodzi w reakcje z innymi cząsteczkami. Jest on jednak pierwiastkiem krótkożyciowym (okres połowicznego rozpadu to około 3,8 doby) i rozpada się na szereg innych pierwiastków, które są ciałami stałymi i mogą osadzać się w pęcherzykach płucnych, a następnie ulegać dalszym rozpadom, podczas których emitowane są cząstki  $\alpha$  i  $\beta$ . Szkodliwość radonu jest więc wynikiem stosunkowo szybkiego jego rozpadu, prowadzącego do powstania kilku krótkożyciowych pochodnych ( $^{222}\text{polon}$   $^{218}\text{Po}$ , ołów  $^{206}\text{Pb}$ ), również radioaktywnych. Pochodne radonu są wdychane wraz ze znajdującymi się w powietrzu pyłami, dymem tytoniowym, łączą się z cząsteczkami płynu tworząc tzw. aerozole promieniotwórcze. **Do pęcherzyków płucnych dostają się jedynie cząstki najmniejsze, posiadające średnicę poniżej  $0,1 \mu\text{m}$ . Cząstki o większych średnicach osadzają się w górnych drogach oddechowych, skąd mogą być usunięte podczas kaszlu w ciągu kilku godzin.** Najmniejsze cząstki migrują do pęcherzyków płucnych, emitują stąd promieniowanie  $\alpha$ . Mogą przebywać tam przez miesiące lub lata, przyczyniając się do napromieniowania narządów wewnętrznych. **Drobne cząstki promieniotwórcze mogą przenikać z pęcherzyków płucnych do krwi lub naczyń limfatycznych, a następnie przemieszczać się do**

**węzłów chłonnych.** Rozpad pochodnych radonu (poprzez emisję cząstek  $\alpha$ ) na ściankach płuc ma istotny wpływ wielkość dawki otrzymanej przez organy wchodzące w skład układu oddechowego. Ich zatrzymanie w płucach może powodować uszkodzenia radiacyjne, prowadzące do rozwoju choroby nowotworowej. W ten sposób mogą zwiększać ryzyko występowania nowotworów płuc. **Promieniowanie jonizujące, a dokładnie radon i jego pochodne wdychane z powietrzem atmosferycznym są drugim po paleniu tytoniu czynnikiem decydującym o zapadalności na nowotwór złośliwy płuc.**

Głównym skutkiem zdrowotnym występowania radonu w wysokich stężeniach są choroby nowotworowe układu oddechowego. Emitowane podczas rozpadów promieniowania  $\alpha$  i  $\beta$  mają zdolność jonizacji, czyli powodowania szeregu uszkodzeń w wyniku zderzeń z makrocząsteczkami takimi jak, białka, tłuszcze czy kwasy nukleinowe oraz stymulowania powstawania zwiększonej ilości szkodliwych wolnych rodników. Najbardziej niebezpiecznymi uszkodzeniami, wywołanymi przez promieniowanie, są zmiany w DNA, które mogą zakłócić prawidłowe funkcjonowanie całej komórki i w rezultacie prowadzić do powstania nowotworu. Ze względu na długi czas przebywania pochodnych radonu w pęcherzykach płuc, narząd ten jest szczególnie narażony na ich działanie. **Najważniejszym uszkodzeniem są zmiany w DNA, które mogą prowadzić do indukcji nowotworów układu oddechowego, głównie płuc, oraz białaczki.**

Końcowym produktem procesów rozpadu radonu jest stabilny ołów  $^{206}\text{Pb}$ , który może na stałe zostać wbudowany w organizm. Odkłada się on w pęcherzykach płucnych, z których przechodzi do krwiobiegu, a następnie wraz z krwią przenika do innych narządów. Przy dużym wchłanianiu tego pierwiastka, z czasem może dojść do objawów tzw. **ołowicy** i w rezultacie do uszkodzenia nerek, wątroby oraz układu nerwowego. Już w XIX wieku opisano zwiększoną zapadalność na raka płuc wśród górników. Jednak dopiero w 1921 roku, analizując przypadki raka płuc u górników z czeskich i niemieckich kopalni, stwierdzono możliwy związek tej choroby z radonem. Podobne wyniki uzyskano w badaniach na zwierzętach narażonych na różne stężenia radonu i jego pochodne. Analiza zbiorcza *Komitetu Narodowej Akademii Nauk do spraw Biologicznych Efektów Promieniowania Jonizującego (BEIR)* przeprowadzona na przełomie XX i XXI wieku potwierdziła związek zwiększonej zapadalności na nowotwory płuc z narażeniem na radon.

Radon może osiągać szkodliwe stężenie również w powietrzu pomieszczeń mieszkalnych i biurowych. Przeprowadzona przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) i opublikowana w 2009 roku analiza wyników

badań na populacjach europejskiej, chińskiej i amerykańskiej, obejmująca łącznie 11 712 osób z rakiem płuca i 20 962 osób zdrowych, wykazała zależność liniową pomiędzy czasem narażenia i stężeniem radonu, a ryzykiem rozwoju raka płuca.

Udowodniono, że stałe narażenie na wdychanie radonu i jego pochodnych jest szkodliwe, jednak od wielu lat wiadomo też, że **radon może działać prozdrowotnie**. W związku z tym, jest wykorzystywany w medycynie, głównie w zabiegach kąpielowych, do płukania jamy ustnej, do picia i inhalacji. Do terapii radonowych wykorzystuje się wody lecznicze pochodzące z naturalnych źródeł lub z odwiertów, rzadziej z wyrobisk po kopalniach uranowych. Za wody radoczyste uznaje się te o zawartości radonu powyżej 74 Bq/l, a za posiadające działanie lecznicze podczas kąpieli te o zawartości Rn powyżej 370 Bq/l.

Działanie wód radonowych opiera się na założeniu, że niewielkie dawki promieniowania indukują naprawę DNA w komórkach. Wykazano, że przy dawkach poniżej 100 mSv aktywowane są mechanizmy obronne prowadzące do eliminowania uszkodzonych komórek lub do naprawy uszkodzeń DNA. Według światowych obserwacji **korzystne działanie małych dawek promieniowania przeważa nad potencjalnym ryzykiem**. Przykładem są mieszkańcy japońskiego regionu Misasa, którzy korzystają ze znanych od 800 lat naturalnie radioaktywnych gorących źródeł (9,5 kBq/l, temp. 65°C). Pomimo, że tamtejsza ludność korzysta z nich nawet kilka razy dziennie, nie stwierdzono w tej populacji zwiększonej liczby mutacji, bezpłodności czy zaburzeń w obrazie morfologii krwi. Wręcz przeciwnie, częstość zgonów z powodu nowotworów jest tam prawie dwukrotnie niższa niż w okolicznych miejscowościach. Prozdrowotne działanie radonu potwierdza słuszność teorii, tzw. hormezy radiacyjnej, która zakłada, że niewielkie dawki promieniowania działają stymulująco na naprawę DNA w organizmie i aktywują mechanizmy ochronne neutralizujące wolne rodniki. To samo promieniowanie w dużych dawkach jest szkodliwe.

Uznaje się, że działanie terapii radonowej jest dwuetapowe. W pierwszym etapie działa bezpośrednio i krótkotrwale promieniowanie  $\alpha$ , emitowane podczas rozpadu radonu. Obejmuje to czas stosowania zabiegu i krótki czas po jego zakończeniu. W drugim etapie oddziałuje promieniowanie  $\alpha$  i  $\beta$ , pochodzące z dalszych rozpadów pochodnych radonu. To działanie zaczyna się po zastosowaniu kilku zabiegów i polega na bezpośrednim lub pośrednim działaniu na gruczoły wydzielania wewnętrznego. Efekt

tego oddziaływania można zauważyć po około 2 tygodniach od rozpoczęcia kuracji, a jego utrzymywanie się nawet przez 2-3 miesiące po zakończeniu terapii.

Badania naukowe potwierdzają korzystne działanie kąpiei radonowych w chorobach obwodowego układu nerwowego, reumatycznych i narządu ruchu. Stosuje się je także w niektórych postaciach niewydolności wieńcowej, astmy, nadciśnieniu tętniczym i chorobach naczyń obwodowych, a także w zaburzeniach okresu przekwitania oraz niepłodności męskiej i żeńskiej. W wyniku terapii radonem następuje zwiększenie wydzielania hormonów kory nadnerczy (adrenaliny i noradrenaliny), a także hormonów płciowych żeńskich i męskich. Zabiegi tego typu korzystnie wpływają na skórę. Poprawiają jej ukrwienie i elastyczność, radon ma także działanie antyalergiczne, przeciwzapalne i przeciwświądowe. Przede wszystkim jednak kąpiele w wodach radoczynnych dają efekty przeciwbólowe, utrzymujące się nawet do 12 miesięcy po zakończeniu kuracji. Dlatego radonoterapia jest pomocna w leczeniu zmian zwyrodnieniowych stawów, kręgosłupa, a także w stanach po urazach i złamaniach.

Istnieją jednak przeciwwskazania do stosowania inhalacji i kąpiei radonowych, z których najważniejsze to istniejące już choroby nowotworowe, niewydolność krążenia czy padaczka. Ponadto, brakuje badań potwierdzających całkowite bezpieczeństwo stosowania inhalacji radonowych. Jednak przede wszystkim ich pozytywny i długotrwały wpływ przeciwbólowy, a przy tym możliwość ograniczenia stosowania środków farmakologicznych oraz inne korzyści zdrowotne sprawiają, że są one nadal chętnie stosowaną terapią w leczeniu wielu schorzeń.

## Radon a palenie tytoniu

Szkodliwość palenia tytoniu jest już powszechnie znana. Uważa się, że aktywne palenie odpowiada za około 90% zachorowań na raka płuc. Niewiele osób natomiast zdaje sobie sprawę, że kolejnym czynnikiem decydującym o zapadalności na nowotwór złośliwy płuc jest promieniowanie jonizujące, a dokładnie wdychanie występującego w powietrzu promieniotwórczego pierwiastka, jakim jest radon. Radon i jego pochodne są odpowiedzialne za znaczną liczbę nowotworów złośliwych płuc.



Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) radon jest drugim, tuż po paleniu tytoniu, najgroźniejszym czynnikiem wywołującym raka płuc na świecie, a u osób niepalących może być nawet główną przyczyną tego nowotworu. Często narażenie to uważane jest za porównywalne z paleniem tytoniu. W związku z doniesieniami odnośnie związku narażenia na radon z ryzykiem wystąpienia raka płuc, w 1988 r. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) zakwalifikowała radon do **grupy 1 kancerogenów**. W 2005 r. Amerykańska Agencja ochrony Środowiska (EPA) uznała ekspozycję na radon w pomieszczeniach za drugi po paleniu tytoniu czynnik ryzyka wystąpienia raka płuc u osób palących oraz jako pierwszy u niepalących. Wzrost liczby przypadków raka płuc można zaobserwować już przy stężeniu radonu w powietrzu poniżej 200 Bq/m<sup>3</sup>. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) od 3 do 14% przypadków raka płuc na świecie jest spowodowane przez radon w powietrzu pomieszczeń. Natomiast, Komitet Naukowy Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR) szacuje, że radon powoduje 1 na 10 przypadków nowotworów płuc. Z kolei badania polskie sugerują, że radon jest przyczyną 9% przypadków raka płuc.

Ponadto, **radon istotnie zwiększa ryzyko nowotworu u osób palących i odwrotnie**, palenie sprzyja rozwojowi raka płuc przy narażeniu na radon i jego pochodne. Występuje tu zjawisko synergizmu, czyli wzajemnego wzmacniania się działania dwóch czynników szkodliwych. **Niekorzystny wpływ radonu i palenia tytoniu łącznie jest większy niż suma efektów obu czynników**. Ryzyko wystąpienia raka płuc u palaczy narażonych na działanie radonu jest ok. 6-10 razy wyższe niż w przypadku osób niepalących.

Według Agencji Ochrony Środowiska (EPA) ekspozycja na radon na poziomie do 148 Bq/m<sup>3</sup> w ciągu całego życia spowoduje rozwój raka płuca u 7 osób spośród 1000 niepalących i aż u 63 osób spośród 1000 palących tytoń. Wyniki szwedzkich badaczy potwierdziły, że w przypadku jednakowych stężeń radonu ryzyko wystąpienia raka płuc u osób, które nigdy nie paliły było czterokrotnie niższe niż dla ogółu populacji i dziesięciokrotnie niższe niż ryzyko nowotworu u palących jedną paczkę papierosów dziennie.

Osoby palące wdychają radon pochodzący z dymu papierosowego. Toksyczny dym papierosowy, wdychany w pomieszczeniu o wysokim stężeniu radonu wnika głęboko do płuc. Tytoń może być nawożony fosfatami zawierającymi uran, z którego w wyniku rozpadu powstają: rad-226, radon-222, ołów-210 i polon-210. Zawartość tych pierwiastków radioaktywnych w dymie tytoniowym może być różna w zależności od

rejonu upraw, sposobu nawożenia i technologii wytwarzania papierosów, dlatego trudno określić, jaką dawkę promieniowania wdychają palacze. Jednak amerykańscy lekarze szacują, że człowiek palący półtorej paczki papierosów dziennie przez rok otrzymuje dawkę promieniowania odpowiadającą 300 zdjęciom rentgenowskim.

Palenie biernie jest uważane za trzecią, po nadużywaniu alkoholu i aktywnym paleniu papierosów, przyczyną śmierci, której można uniknąć. W związku istniejącymi obecnie zakazami palenia w miejscach publicznych, na bierne wdychanie dymu tytoniowego jesteśmy najbardziej narażeni we własnych domach, jeśli mieszkamy z osobą aktywnie palącą. Udowodniono, że osoba codziennie wdychająca biernie dym tytoniowy ma wyższe o 15% ryzyko zgonu w porównaniu do osoby, która nie przebywa z osobami palącymi. Osoby biernie wdychające dym tytoniowy również pochłaniają wspomniane wcześniej pierwiastki promieniotwórcze zawarte w tytoniu, w tym radon, gdyż co najmniej połowa z tych izotopów ulatnia się do otoczenia. Uważa się, że dzieci są 1,5-2 razy bardziej wrażliwe na działanie wdychanego radonu i jego pochodnych niż osoby dorosłe. Badania przeprowadzone w Wielkiej Brytanii wykazały, że narażenie na radon w pomieszczeniach powoduje 1100 zgonów na raka płuc rocznie u osób palących obecnie i w przeszłości.

## Tereny, na których spodziewane jest podwyższone stężenie radonu w powietrzu pomieszczeń

Zgodnie z ustawą z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz. U. z 2019 r. poz. 1792 oraz z 2020 r. poz. 284 i 322) **poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi wynosi 300 Bq/m<sup>3</sup>.**

Tereny, na których spodziewane jest podwyższone stężenie radonu w powietrzu wskazuje 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. z 2020 poz. 1139).

Zgodnie z tym Rozporządzeniem, na następujących obszarach Polski można spodziewać się podwyższonego tj. przekraczającego **300 Bq/m<sup>3</sup>** średniorocznego stężenia radonu w powietrzu w pomieszczeniach:

- ✓ **W województwie dolnośląskim:**
  - powiaty dzierżoniowski, jeleniogórski, kamiennogórski, kłodzki, lubański, lwówecki, polkowicki, trzebnicki, wałbrzyski, ząbkowicki, zgorzelecki, złotoryjski, miasto na prawach powiatu Jelenia Góra, miasto na prawach powiatu Wałbrzych
- ✓ **W województwie lubelskim:**
  - powiat tomaszowski
- ✓ **W województwie opolskim:**
  - powiaty nyski i prudnicki
- ✓ **W województwie podkarpackim:**
  - powiaty bieszczadzki, jasielski, krośnieński, leski, mielecki, sanocki
- ✓ **W województwie śląskim:**
  - powiat cieszyński
- ✓ **W województwie świętokrzyskim:**
  - powiaty kielecki, opatowski, skarżyski

Powyższe obszary zostały wytypowane na podstawie wyników badań naukowych przeprowadzonych przez różne ośrodki naukowe w Polsce na przestrzeni dziesiątków lat. Nie przeprowadzono jednak dotąd badań kompleksowych, które pozwoliłyby jednoznacznie określić, jakie średnie stężenia radonu występują w poszczególnych województwach czy krainach geograficznych.

Uważa się, że obszary podwyższonego ryzyka obejmują około 10% obszaru kraju, gdzie stężenie radonu w gruncie przekracza 50 Bq/m<sup>3</sup>. Są to regiony południowej Polski. Najwyższe stężenie radonu w budynkach mieszkalnych występuje w Sudetach (845 Bq/m<sup>3</sup>).

W latach 2020-2023 na zlecenie Głównego Inspektoratu Sanitarnego prowadzone są pomiary średniorocznego stężenia radonu w powietrzu pomieszczeń budynków użyteczności publicznej na terenie wszystkich województw.

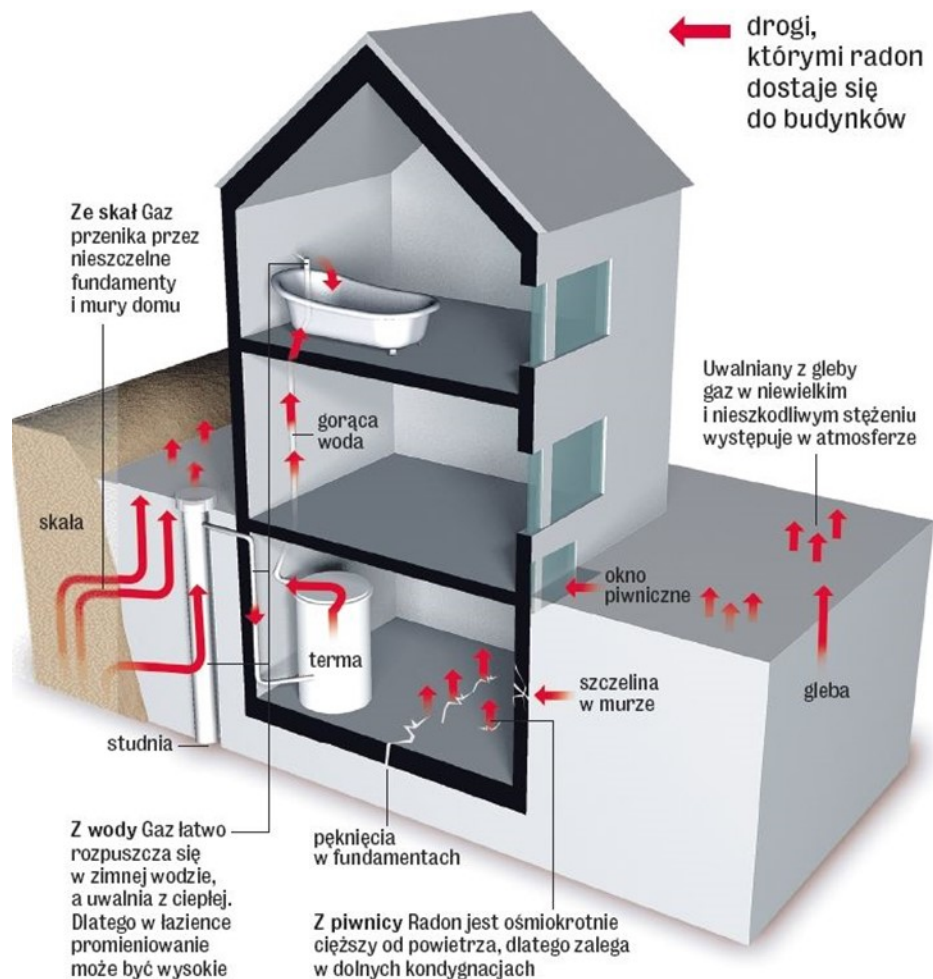
## Przenikanie radonu do wnętrza budynków

**Radon obecny jest w każdym budynku i mieszkaniu w różnych stężeniach** w zależności od budowy geologicznej terenu, na którym jest posadowiony. Radon powstaje w skałach w skorupie ziemskiej, a następnie migruje na powierzchnię ziemi poprzez uskoki geologiczne, spękania, przepuszczalne gleby. Uwalnianie radonu z gleby i produktów pochodzenia mineralnego zawierających rad odbywa się w wyniku następujących procesów: emanacji, transportu i ekshalacji. **Emanacja** polega na uwolnieniu radonu z ziaren skał i minerałów będących składnikiem gruntu lub materiałów budowlanych do przestrzeni międzyziarnowej. **Transport** to migracja uwolnionego radonu w przestrzeni międzyziarnowej wypełnionej wodą, powietrzem gruntowym lub innym gazem. **Ekshalacja** to proces wydobywania się radonu z podłoża do powietrza w przyziemnej warstwie atmosfery lub z materiałów budowlanych do powietrza w pomieszczeniach. Wielkość emanacji radonu z gruntu jest zależna od miejsca (rodzaj gleby, geologia podłoża), od warunków atmosferycznych oraz od możliwości jego migracji i akumulacji. Przenikanie (transport) radonu z gruntu do budynków uzależnione jest od przepuszczalności gruntu, która z kolei związana jest z wilgotnością, porowatością i gęstością gruntu oraz rozmiarem ziaren mineralnych. Na migrację radonu mogą mieć wpływ zjawiska **dyfuzji** (proces samorzutnego rozprzestrzeniania się i przenikania cząstek lub energii w każdym ośrodku: gazie, cieczy lub ciele stałym) i **konwersji** (zmiana właściwości materiałów przekształconych w wyniku różnych reakcji chemicznych, które zależą z kolei od parametrów meteorologicznych). **Transport radonu odbywa się najaktywniej w sąsiedztwie uskoków, skał szczelinowych i utworów skrasowiałych poprzez połączone ze sobą systemy szczelin i pęknięć.** (1-3).

Stężenie radonu w powietrzu na zewnątrz budynków zależy od szybkości ekshalacji z powierzchni ziemi oraz od warunków atmosferycznych np. nasłonecznienia, wiatru. W związku z tym, że radon jest

cięższy od powietrza, może gromadzić się w jaskiniach, sztolniach, kopalniach, a także w innych najniżej położonych pomieszczeniach jak podziemia i piwnice.

**Radon dostaje się do budynku wraz z powietrzem zasysanym z gruntu przez szczeliny w fundamentach, spękania w murach budynku i podłodze, przez studzienki kanalizacyjne, nieszczelności wokół rur wodno-kanalizacyjnych i przewodów elektrycznych, złącza konstrukcyjne oraz z materiałów budowlanych.**



Rycina: Drogi wnikania radonu do budynku

źródło:[http://meteo.geo.uni.lodz.pl/oldmeteo/stronki/radon/drogi\\_wnikania\\_rn\\_newsweek.jpg](http://meteo.geo.uni.lodz.pl/oldmeteo/stronki/radon/drogi_wnikania_rn_newsweek.jpg)

Wewnątrz budynku radon przemieszcza się wykorzystując kanały wodno-kanalizacyjne, a w budynkach z wielkiej płyty szczeliny pomiędzy płytami (4).

Stężenie radonu obserwowane w budynkach mieszkalnych uzależnione jest od procesów powstawania i rozpadu radonu oraz stężenia radu w gruncie, przepuszczalności i porowatości gruntu. Wpływ na stężenie radonu w budynkach mają też parametry budynku, szczególnie rodzaj podpiwniczenia (wylewka betonowa, płytki ceramiczne, ziemia) oraz szybkość wentylacji pomieszczeń. Szczelna warstwa betonu pod podłogą może uniemożliwić przenikanie radonu z gruntu do budynku. Na stężenie radonu w budynkach wpływ może mieć także szczelność pomieszczeń i wentylacja (grawitacyjna i wymuszona) oraz warunki pogodowe (temperatura, wiatr), a także przyzwyczajenia mieszkańców (wietrzenie, palenie tytoniu) (5).

Średnie stężenie radonu w pomieszczeniach mieszkalnych na świecie wynosi około  $39 \text{ Bq/m}^3$ , w Europie  $21\text{-}110 \text{ Bq/m}^3$  (6-7). **Średnie stężenia radonu w budynkach w Polsce wynosi  $32 \text{ Bq/m}^3$**  wahając się od kilkunastu do kilku tysięcy  $\text{Bq/m}^3$ . Pomiary stężenia radonu z 2011 r. wykazały, że najwyższe stężenie radonu w budynkach mieszkalnych występuje w Sudetach ( $845 \text{ Bq/m}^3$ ), a najwyższą średnią geometryczną ( $231 \text{ Bq/m}^3$ ) wykazano na Mazurach i Podlasiu (1, 8-9).

Narażenie na promieniowanie jonizujące wewnątrz budynku jest średnio o kilkadziesiąt procent wyższe niż na zewnątrz (10). **Źródłem radonu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi są materiały budowlane pochodzenia mineralnego, radon przenikający z gruntu, oraz w znacznie mniejszym stopniu radon zawarty w wodzie wodociągowej i gazie ziemnym** (11-12). Według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (13) **86 – 90 % radonu w budynkach pochodzi z podłoża, 2 – 5 % z materiałów budowlanych, a poniżej 1 % z wody**. Jego ilość zależy, więc głównie od typu podłoża, na którym są posadowione budynki.

**Stężenie radonu w powietrzu jest najwyższe przy powierzchni ziemi, a więc w piwnicach, następnie na parterze** (w kuchni jest wyższe niż w pokoju, gdyż dochodzi radon uwalniany z wody wodociągowej i gazu ziemnego), obniżając się na wyższych kondygnacjach (4). Z kolei, **na wyższych kondygnacjach** maleje wpływ radonu docierającego z podłoża a większego **znaczenia nabierają materiały budowlane**, z których wykonane są stropy i ściany budynku oraz rodzaj ich wykonania. **Stężenia te ulegają również zmianom sezonowym i dobowym** (14). **W ciągu roku najniższe stężenie występuje w okresie letnim, a najwyższe zimą.** Z kolei, **w ciągu doby najwyższe wartości są obserwowane w nocy, a najniższe w południe.**

## Dostępne środki techniczne oraz zachowania prozdrowotne służące ograniczeniu stężeń radonu w pomieszczeniach i jego niekorzystnemu wpływowi na zdrowie

Budynki przeznaczone na pobyt ludzi powinny spełniać wymagania odnośnie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w zastosowanych materiałach budowlanych oraz średnich rocznych stężeń radonu w powietrzu pomieszczeń (10). W obecnie obowiązującym Prawie Atomowym ustalono poziom odniesienia dla narażenia zewnętrznego ludzi na promieniowanie  $\gamma$  emitowane przez **materiały budowlane** wewnątrz pomieszczeń wynoszący **1 mSv rocznie**. Źródłem radonu są, jak już wspomniano, np. materiały zastosowane do budowy domu. Wynika to z użycia do produkcji materiałów budowlanych naturalnie występujących w przyrodzie minerałów. Materiały takie mogą zawierać rad i tor (15). Spośród krajowych wyrobów budowlanych, **najniższą zawartością naturalnych pierwiastków promieniotwórczych** (max mniejszy od 35% wartości granicznej) charakteryzują się **beton komórkowy** produkowany z zastosowaniem piasku, **beton zwykły, cegła sylikatowa, gips i wapno**. Do materiałów **o średniej zawartości pierwiastków promieniotwórczych** (max mniejszy od 60% wartości granicznej) zaliczyć można **beton lekki z kruszywem keramzytowym**. **Materiały budowlane o najwyższej zawartości pierwiastków promieniotwórczych to cegła ceramiczna z glin krajowych i żużlobeton** tj. beton komórkowy produkowany z zastosowaniem popiołów lotnych (16-17).

Podczas budowy domu, a szczególnie fundamentów, ma miejsce przekopanie się do głębszych warstw gruntu, gdzie stężenie radonu jest wyższe niż na jego powierzchni. Powoduje to wystąpienie tzw. **efektu kominowego**, tj. zasysania radonu do wnętrza budynku w związku z różnicą ciśnień wewnątrz budynku, gdzie jest ono niższe w porównaniu do ciśnienia panującego na zewnątrz. Najwyższych stężeń radonu należy, zatem spodziewać się w pomieszczeniach piwnicznych, graniczących bezpośrednio z gruntem (18).

*Na etapie budowy domu, można zastosować następujące metody zmniejszenia stężenia radonu:*

- **specjalną konstrukcję fundamentów** ze wzmocnionymi krawędziami, zapobiegającą nieszczelnościom między płytą i ścianami, którymi radon może wnikać do wnętrza.
- **uszczelnianie fundamentów i zastosowanie systemu wentylacji jednocześnie.** Konstrukcja taka składa się z rur montowanych przed wylaniem płyty fundamentowej oraz ułożonych mat izolacyjnych.
- **grubą, szczelną płytę fundamentową** i wymuszoną wentylację pod płytą oraz częściową wymianę gruntu pod fundamentem
- **wykorzystanie materiałów budowlanych**, w których nie stwierdzono podwyższonych stężeń pierwiastków promieniotwórczych.

*W istniejących już budynkach można zastosować następujące metody:*

- zmniejszenie stężenia radonu w budynkach przez **zastosowanie tzw. studni radonowej.** Pod fundamentami lub obok budynku instaluje się wentylatory o dużej mocy, które wysysają powietrze



glebowe spod budynku i wyrzucają je do atmosfery na wysokość ok. 2 m. W ten sposób obniżają ciśnienie powietrza w podłożu.

- zmniejszenie stężenia radonu w powietrzu pomieszczeń można osiągnąć także stosując **system poduszki powietrznej**. Metoda polega na wypompowaniu powietrza z wnętrza budynku pod jego fundamenty. W związku z tym, że powietrze glebowe jest wypychane spod fundamentów przez powietrze wnętrza budynku, w którym stężenie radonu jest niższe, stężenie radonu w podłożu obniża się, a co za tym idzie także stężenie radonu w budynku ulega zmniejszeniu.
- **podwyższenie ciśnienia** przez zastosowanie instalacji nawiewu z poddasza, wytwarzającej nadciśnienie w budynku w celu zmniejszenia wpływu efektu kominowego oraz wiatru. Zapobiega to zasysaniu radonu z podłoża.
- **wentylację przestrzeni podpodłogowej**, która usuwa poza budynek radon, który przeniknął z podłoża, uniemożliwiając jego przejście do wyżej położonych pomieszczeń. Wentylacja taka wymaga istnienia powierzchni podpodłogowej, którą można przewietrzać w sposób naturalny lub wymuszony.
- **depresję podpodłogową (pułapkę radonową)**, która uważana jest za najskuteczniejszy czynnik redukujący stężenie radonu w budynkach. Jest to wgłębienie w kształcie studzienki (studni radonowej) w gruncie pod budynkiem lub w piwnicy z wentylatorem wyciągającym powietrze poza budynek, a więc wytwarzającym we wgłębieniu podciśnienie. Radon wysysany jest z przestrzeni pod budynkiem zanim przeniknie do wnętrza.
- **wysysanie powietrza zawierającego radon spod płyty fundamentowej**. Wysysanie powietrza jest najbardziej wydajne w przypadku braku litej płyty betonowej. Jeśli płyta istnieje wysysanie następuje przez szczeliny, pęknięcia i inne nieszczelności.

- **wymianę gruntu wokół budynku** na grunt zawierający znacznie mniej izotopu radu, z którego powstaje radon. Należy dodatkowo zastosować izolację i drenaż.

#### *Metody proste i nisko kosztowe*

- **likwidacja nieszczelności** w fundamentach, podłogach lub ścianach oraz wokół instalacji doprowadzających media. Można w tym celu zastosować **silikon**, jak również **folie i papy antyradonowe**.
- **częste i długotrwałe wietrzenie** przez otwarcie okien. Wietrzenie powoduje, że ciśnienie powietrza i stężenie radonu w pomieszczeniu zrównują się z ciśnieniem atmosferycznym i stężeniem radonu w powietrzu na zewnątrz budynku.
- **zwiększenie częstości wymian powietrza** za pomocą mechanicznego systemu wentylacyjnego. Zadaniem wentylacji nawiewowo-wywiewnej jest wymiana powietrza. W miejsce wywiewanego „zużytego” powietrza napływa „świeże”, które równocześnie zawiera mniej radonu

#### *Piśmiennictwo*

1. Korzeniowska-Rejmer E (2008) Radon w gruncie i techniki redukcji jego stężenia w obiektach budowlanych. CzT, R105, z I-Ś, 73-88.
2. Mamont-Cieśla K. (2012). Radon – promieniotwórczy gaz w środowisku człowieka. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej
3. Janik M. (2005) Przenikanie radonu z gruntu do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych. Praca doktorska. Raport Nr 1966/AP. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk. Kraków

4. Pachocki KA, Gorzkowski B, Różycki Z, Pilejczyk E, Smoter j (2000) Radon <sup>222</sup>Ra w budynkach mieszkalnych Świeradowa Zdroju i Czerniawy Zdroju. Rocz. PZH, 51(3), 291-8.
5. Fujimoto K, Sanada T. (1999) Dependence of Indoor Radon Concentration on the Year of House Construction. Health Phys. 77, 410-419.
6. Olszewski J, Zmyślony M, Wrzesień M et al. (2015) Occurrence of radon in the Polish underground tourist routes. Med Pr., 66(4), 557-63.
7. Kim S.H., Hwang W.J., Cho J.S., et al. (2016) Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure. Ann Occup Environ Med. 28;1 - 8.
8. Przylibski TA, Żebrowski A, Karpińska M et al. (2011) Mean annual <sup>222</sup>Rn concentration in homes located in different geological regions of Poland – first approach to whole country area. J Environ Radioact, 102(8), 735-41.
9. Gawętek, E.; Drozdowska, B.; Fuchs, A. (2017) Radon as a risk factor of lung cancer. Przegl. Epidemiol., 71, 90–98.
10. Dohojda M (2004) Prognozowanie stężenia aktywności radonu w pomieszczeniach zamkniętych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej. Kwartalnik nr 1 (129).
11. Nazaroff WW, Nero AV (1988) Radon and Its Decay Products in Indoor Air. John Wiley and Sons. New York
12. Mamont-Cieśla K (1993) Radon w mieszkaniach. Przegląd Budowlany,
13. EPA Environmental Protection Agency (USA). National Radon Action Month. [www.epa.gov/radon/nram](http://www.epa.gov/radon/nram)
14. Kozak K., Mazur J., Kozłowska B., Karpinska M., Przylibski T.A., Mamont-Cieśla K., Grządziel D., Stawarz O., Wysocka M., Dorda J., et al. (2011) Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. App. Radiat. Isot., 69:1459–1465.
15. Raport roczny za 2017. CLOR 22.03.2019
16. Krawczyk M. (1992) Promieniotwórczość naturalna materiałów budowlanych. Materiały Budowlane, nr 8-9, s. 23-25 i nr 10, 1992, s. 23-26. 17. Brukarski L, Dohojda M (1999) Promieniowanie jonizujące w budynkach wielkopłytowych. Prace Instytutu techniki Budowlanej. Kwartalnik nr 1(109)18. NCRP Report, 1989, 103.

