

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 i 5/2023: „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:**

PROF. DR HAB. N. MED. I N. O ZDR. MAŁGORZATA DOBRZYŃSKA  
DR ANETA GAJOWIK  
MGR KAMIL WIEPRZOWSKI

Spis treści

<b>Wprowadzenie - promieniowanie jonizujące .....</b>	<b>2</b>
<b>Pochodzenie i występowanie radonu .....</b>	<b>4</b>
<b>Niekorzystny wpływ radonu na organizm i zdrowie człowieka .....</b>	<b>7</b>
<b>Radon a palenie tytoniu .....</b>	<b>10</b>
<b>Prozdrowotne działanie radonu .....</b>	<b>12</b>
<b>Tereny, na których spodziewane jest podwyższone stężenie radonu w powietrzu pomieszczeń .....</b>	<b>13</b>
<b>Przenikanie radonu do wnętrza budynków .....</b>	<b>14</b>
<b>Dostępne środki techniczne oraz zachowania prozdrowotne służące ograniczeniu stężeń radonu w pomieszczeniach i jego niekorzystnemu wpływowi na zdrowie .....</b>	<b>19</b>
<b>Piśmiennictwo.....</b>	<b>22</b>

## Wprowadzenie - Promieniowanie jonizujące

Promieniowanie to wysyłanie i przekazywanie energii, inaczej mówiąc, jeżeli ciało fizyczne promieniuje to znaczy, że emituje energię.

Promieniowanie jonizujące stale towarzyszy człowiekowi. Jednakże, zjawisko promieniotwórczości znane jest dopiero od końca XIX wieku. W 1895 roku Wilhelm Konrad Roentgen odkrył promienie X, a w 1896 roku Henryk Becquerel promieniotwórczość naturalną. Stała obecność promieniowania jonizującego w środowisku człowieka oznacza, że wpływa ono w sposób ciągły na nasz organizm. Jego efekty zależą od szeregu czynników, takich jak wielkość dawki, moc dawki, czas narażenia. Promieniowanie jonizujące wywołuje jonizację ośrodka, przez który przechodzi. Zjawisko to polega na odrywaniu elektronów z atomów, wskutek czego w miejsce elektrycznie obojętnych atomów powstają pary jonów: jony dodatnie i uwolnione elektrony. Mechanizm jonizacji może być różny. Może to być **jonizacja bezpośrednia** zachodząca w wyniku bezpośrednich zderzeń cząstki jonizującej z atomami i cząsteczkami ośrodka, lub **pośrednia** tj. za pośrednictwem innych cząstek, które powstały w wyniku oddziaływania promieniowania z materią lub którym promieniowanie przekazało swoją energię. Skutki oddziaływania promieniowania jonizującego na żywą materię mogą być, zatem wynikiem bezpośrednich depozycji w makrocząsteczkach komórki lub są one powodowane pośrednio poprzez wzbudzenie i rozpad cząsteczek wody, czyli jej radiolizę. Wszystkie rodzaje promieniowania (w tym  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ ) wywołują jonizację ośrodka materialnego, czyli oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki albo wybicie go ze struktury krystalicznej. Promieniowanie jonizujące wywołuje uszkodzenie DNA komórek, zarówno bezpośrednio, poprzez przerwanie jego integralności, jak i pośrednio, m.in. w wyniku tworzenia wewnątrzkomórkowych wolnych rodników tlenowych (1,2).

Promieniowanie jonizujące w zależności od tego czy nośnikiem energii jest cząstka czy fala elektromagnetyczna może mieć charakter:

- ✓ promieniowania korpuskularnego (strumień cząstek)
  - promieniowanie  $\alpha$
  - promieniowanie  $\beta$
  - promieniowanie neutronowe
- ✓ promieniowania elektromagnetycznego (fale).
  - promieniowanie  $\gamma$

- Promieniowanie X

**Promieniowanie  $\alpha$**  - to strumień cząstek  $\alpha$ , czyli szybko poruszających się (rzędu  $10^7$  m/s) jąder helu  $^4\text{He}$ . Posiadają one dodatni ładunek elektryczny i dużą zdolność jonizacji (wysoka energia, duża masa cząstki) ośrodka, przez który przechodzą. Jest to promieniowanie słabo przenikliwe, czyli silnie pochłaniane przez materię, dlatego jego zasięg w powietrzu wynosi do 10 cm i z trudem przenika przez pojedynczą kartkę zwykłego papieru.

**Promieniowanie  $\beta$**  - to strumień elektronów ( $\beta^-$ ) lub pozytonów ( $\beta^+$ ), pochodzących z jąder atomów. Jest to również promieniowanie jonizujące bezpośrednio ośrodek, ale słabiej niż promieniowanie  $\alpha$ , gdyż traci ono na jonizację tylko część swojej energii. Promieniowanie  $\beta$  jest znacznie bardziej przenikliwe niż  $\alpha$ , a więc słabiej pochłaniane przez materię. Zasięg promieniowania  $\beta$  w powietrzu wynosi do 10 m, a tkance jest rzędu mm lub cm w zależności od energii cząstek.

**Promieniowanie neutronowe** powstaje w reakcjach jądrowych i również w reakcjach jądrowych jest pochłaniane. Neutrony są bardzo przenikliwe, ale mają małą zdolność jonizacji. Ze względu na brak ładunku elektrycznego neutrony wywołują jonizację pośrednią, za pomocą innych cząstek wytworzonych w reakcjach łańcuchowych, które jonizują bezpośrednio.

**Promieniowanie  $\gamma$**  - to promieniowanie krótkofalowe o długości fal rzędu  $10^{-14}$  do  $10^{-10}$  metrów. Jest to bardzo przenikliwe promieniowanie pochodzenia jądrowego, które wywołuje jonizację pośrednią na drodze zjawiska fotoelektrycznego, zjawiska Comptona czy zjawiska tworzenia par. Zjawisko fotoelektryczne polega na całkowitym przekazaniu energii fotonu elektronowi swobodnemu lub związanemu na orbicie atomu. Zjawisko Comptona polega na rozpraszaniu fotonów promieniowania  $\gamma$  na swobodnych elektronach, związanym z częściowym przekazaniem energii fotonów elektronom. Zjawisko tworzenia par polega na materializacji kwantu energii i utworzeniu pary cząstek: elektronu i pozytonu.

**Promieniowanie rentgenowskie (promieniowanie X)** - jest jedną z form promieniowania elektromagnetycznego jonizującego, ma długość fal w zakresie od  $10^{-12}$  do  $10^{-8}$  metrów, co odpowiada energiom w zakresie od 120 eV do 120 keV. Długości fal promieniowania rtg są krótsze niż promieniowania UV i dłuższe niż promieniowania  $\gamma$ . Promieniowanie X ma podobne własności jak promieniowanie  $\gamma$ . Różnią się jednak zakresem długości fal i

pochodzeniem: promieniowanie  $\gamma$  pochodzi z jądra, zaś promieniowanie X powstaje w atomie poza jądrem w wyniku wyhamowywania elektronów (1, 3-4).

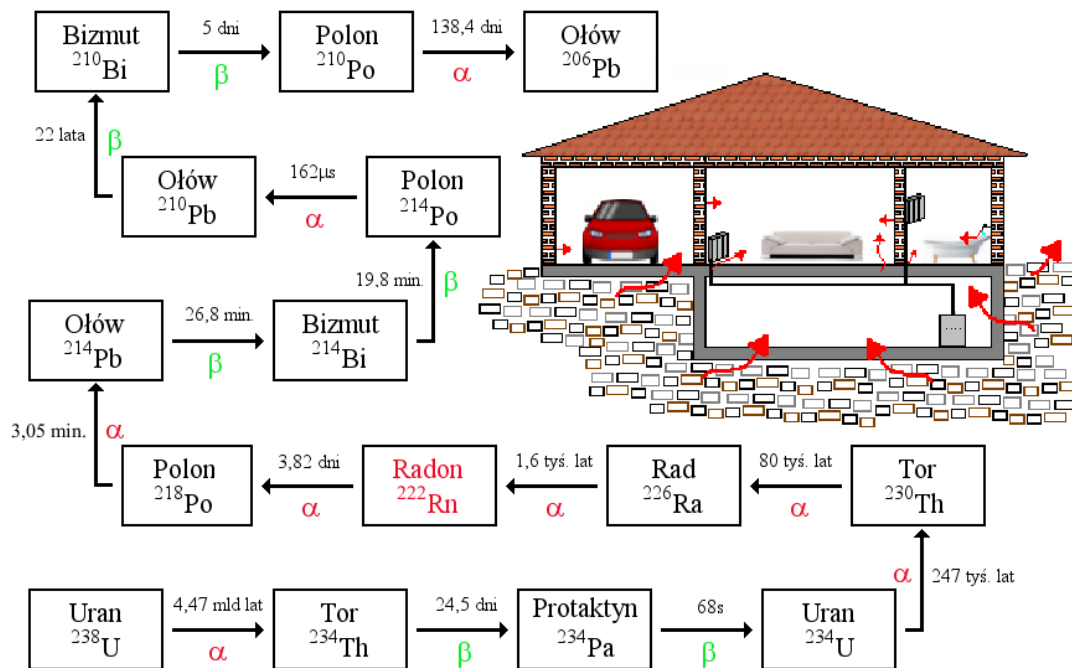
## Pochodzenie i występowanie radonu

Naturalnie pierwiastki promieniotwórcze występują w skorupie ziemskiej. 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. 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 promieniowanie  $\gamma$ .

**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)** (5-6).

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 (7).

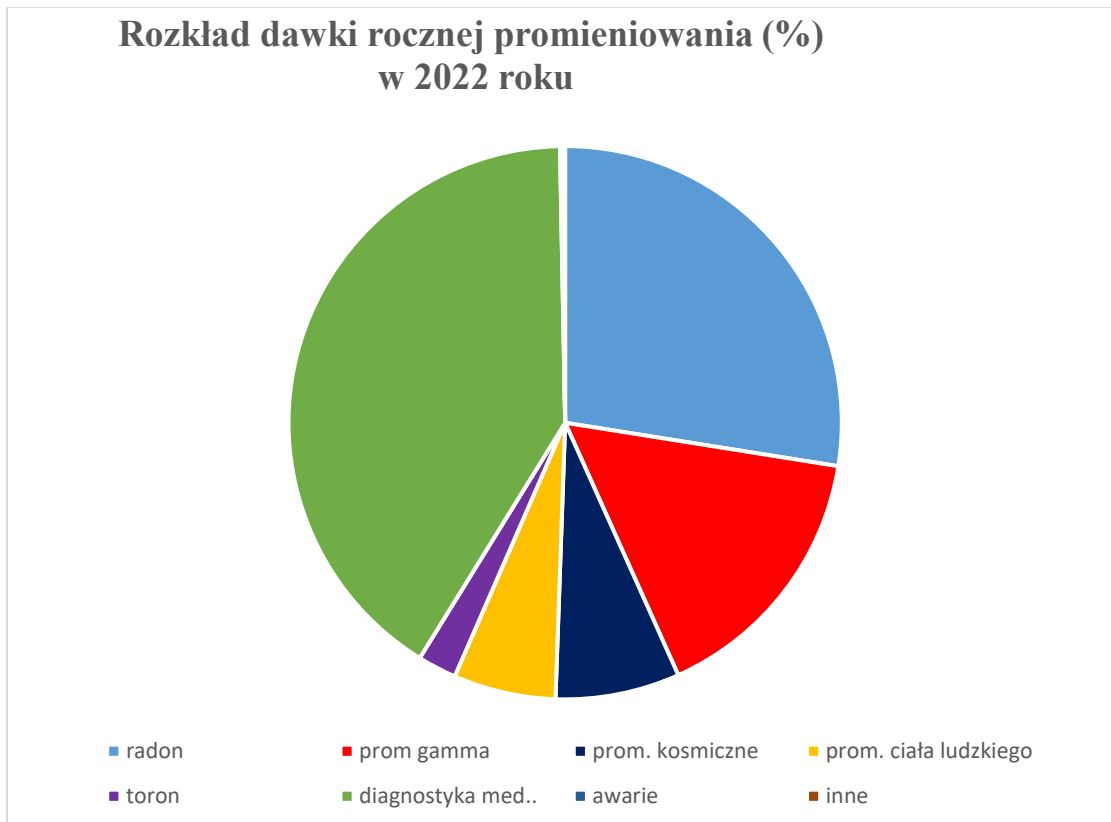


Rycina 1: Szereg uranowo-radowy (źródło: promieniowanie.blog.spot.com)

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 (łączna 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 **2022 roku** wynosiła **4,32 mSv**. Wielkość dawki utrzymuje się na zbliżonym poziomie przez kilka ostatnich lat. **Narażenie od źródeł naturalnych stanowi 58,76% całkowitej dawki skutecznej i wynosi ok. 2,58 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**. **Narażenie ze źródeł sztucznych wynosi 41,24 % czyli 1,8 mSv, z czego na diagnostykę medyczną przypada 41,02 %**, a na awarie i inne przyczyny po 0,1 %. (8)



Rycina 2: Rozkład dawki rocznej promieniowania jonizującego

Obecności radonu nie można wykryć za pomocą zmysłów. Radon jest gazem bezbarwnym, bezwonnym, 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 (6).

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, gdyż tam

zlokalizowane były do lat 70 XX wieku kopalnie uranu. 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 (9).

**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 Bq/m<sup>3</sup>, w Warszawie ok. 2,7 Bq/m<sup>3</sup>. Na podstawie wyników dotychczasowych badań można przypuszczać, że obszary podwyższonego ryzyka obejmują 10% obszaru kraju, gdzie stężenie radonu w gruncie przekracza 50 Bq/m<sup>3</sup>. Są to regiony południowe (10).

## Niekorzystny wpływ radonu na organizm i zdrowie człowieka

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, szybkości oddychania, obszaru płuc i głębokości wniknięcia do nich 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  $\beta$  (11). 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, które 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 (12-13).** Rozpad pochodnych radonu (poprzez emisję cząstek  $\alpha$ ) na ściankach płuc ma istotny wpływ na 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 płuc.** Badania wykazały, że w krajach europejskich, azjatyckich i północnoamerykańskich obecność radonu w stężeniach 100-300 Bq/3 w pomieszczeniach wiąże się z ryzykiem zapadalności na raka płuc, Radon powoduje wszystkie histologiczne typy raka płuc, najczęściej gruczolakoraka, oraz raka drobnokomórkowego i płaskonabłonkowego (12-17). Inne badania wykazały zależny od dawki wzrost ryzyka białaczki u dorosłych i dzieci narażonych na działanie radonu w mieszkaniach (18).

Jak już wspomniano, 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 (19-21).**

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 (22).

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 narażanych 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 (23-24). Analiza zbiorcza *Komitetu Narodowej Akademii Nauk do spraw Biologicznych Efektów Promieniowania Jonizującego (BEIR)*, uwzględniła 11 z przeprowadzonych do 1990 r. badań z Europy, Ameryki Północnej, Azji i Australii (dotyczyła łącznie 60 000 górników, w tym 2 600 zmarło z powodu raka płuca) oraz z pomiarów przeprowadzonych w Niemczech wśród mężczyzn (59 001 osób; 2 388 zmarło z powodu raka płuca) zatrudnionych przez Wismut Company (25-26).

Według badań amerykańskich, 15-20 000 zgonów z powodu raka płuc rocznie związane jest z ekspozycją na radon (27). W związku z doniesieniami na temat związku narażenia na radon z ryzykiem wystąpienia raka płuc, w 1988 r. *Międzynarodowa Agencja do Spraw Badań nad Rakiem (IARC)* zakwalifikowała radon do **grupy 1 kancerogenów** (28). Wzrost liczby przypadków raka płuc można zaobserwować już przy stężeniu radonu 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 pomieszczeniach (26). Natomiast, *Komitet Naukowy Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR)* szacuje, że radon powoduje 1 na 10 przypadków nowotworów płuc rocznie (2). Z kolei badania polskie sugerują, że radon jest przyczyną 9 % przypadków raka płuc (29).

Na uwagę zasługuje fakt, że nie można wykazać wartości stężenia radonu, które byłoby całkowicie bezpieczne dla człowieka. Jednocześnie, radon może być obecny w każdym pomieszczeniu mieszkalnym oraz miejscu pracy. W związku z tym, radon powinien być rozpatrywany jako czynnik wpływający na zdrowie publiczne.

## Radon a palenie tytoniu

Szkodliwość palenia tytoniu jest już powszechnie znana. Uważa się, że aktywne palenie odpowiada za około 90 % zachorowań na raka płuc. Natomiast, niewiele osób zdaje sobie sprawę, że kolejnym decydującym o zapadalności na nowotwór płuc czynnikiem jest promieniowanie jonizujące, a dokładnie wdychanie promieniotwórczego pierwiastka jakim jest radon, który wraz z pochodnymi jest odpowiedzialny za znaczną liczbę nowotworów płuc (14, 30).

*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 nowotworu.* Często narażenie na radon uważane jest za porównywalne ze skutkami palenia tytoniu. (26). W 2005 r. *Amerykańska Agencja ochrony Środowiska (EPA)* uznała ekspozycję na radon w pomieszczeniach za drugi po paleniu tytoniu czynnik ryzyka wystąpienia nowotworu płuc u osób palących oraz jako pierwszy u niepalących (31).

**Radon istotnie zwiększa ryzyko nowotworu u palaczy i odwrotnie, palenie sprzyja rozwojowi raka płuc przy narażeniu na radon i jego pochodne.** Występuje tu zjawisko synergizmu, czyli wzajemnego wzmocnienia 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 (24, 32).

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 tytoni (31). 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 (23, 33).

Osoby palące wdychają radon pochodzący z dymu papierosowego. Toksyczny dym papierosowy, wdychany w pomieszczeniu o wysokim stężeniu radonu wnika głęboko do płuc. Uprawy tytoniu mogą być nawożone 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 (34).

Palenie bierne jest uważane za trzecią, po nadużywaniu alkoholu i aktywnym paleniu papierosów, przyczynę 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 (35-36).

### Prozdrowotne działanie radonu

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 (37-38).

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 morfologii krwi. Wręcz przeciwnie, częstość zgonów z powodu nowotworów jest tam prawie dwukrotnie niższa niż w okolicznych miejscowościach (39). 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 (40).

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  $\beta$  i  $\gamma$ , 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 (41).

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 (42). W Polsce wody o dużej zawartości radonu występują głównie w Sudetach, gdzie w uzdrowiskach stosuje się kąpiele i inhalacje. Zawartość radonu w wodach leczniczych w Łądku Zdroju wynosi 650-1000 Bq/l, a w Świeradowie Zdroju 400-650 Bq/l (43).

Podczas kąpieli radonowych nad powierzchnią wody unosi się „poduszka” powietrzno-radonowa, którą wdychają pacjenci, dlatego to płuca są głównym narządem, przez który wchłania się najwięcej radonu (44). Pojawiający się podczas kąpieli wzrost radioaktywności krwi pochodzi w 68 % z radonu inhalowanego nad powierzchnią wody, a tylko w 33 % z radonu przenikającego przez skórę (45). Ilość radonu wchłanianego przez skórę zależy od stanu jej ukrwienia i natłuszczenia, im większe tym lepsze przenikanie do krwi.

Badania naukowe potwierdzają korzystne działanie kąpieli radonowych w chorobach obwodowego układu nerwowego, reumatycznych i narządu ruchu. Stosuje się je także w niewydolności wieńcowej, dychawicy oskrzelowej, 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 dobrze także 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 (46).

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 (13).

### **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 dzierzoniowski, 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  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Są to regiony południowej Polski. Najwyższe stężenie radonu w budynkach mieszkalnych występuje w Sudetach ( $845 \text{ Bq/m}^3$ ).

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 może osiągać szkodliwe stężenie również w pomieszczeniach 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 nowotworu płuc (26).

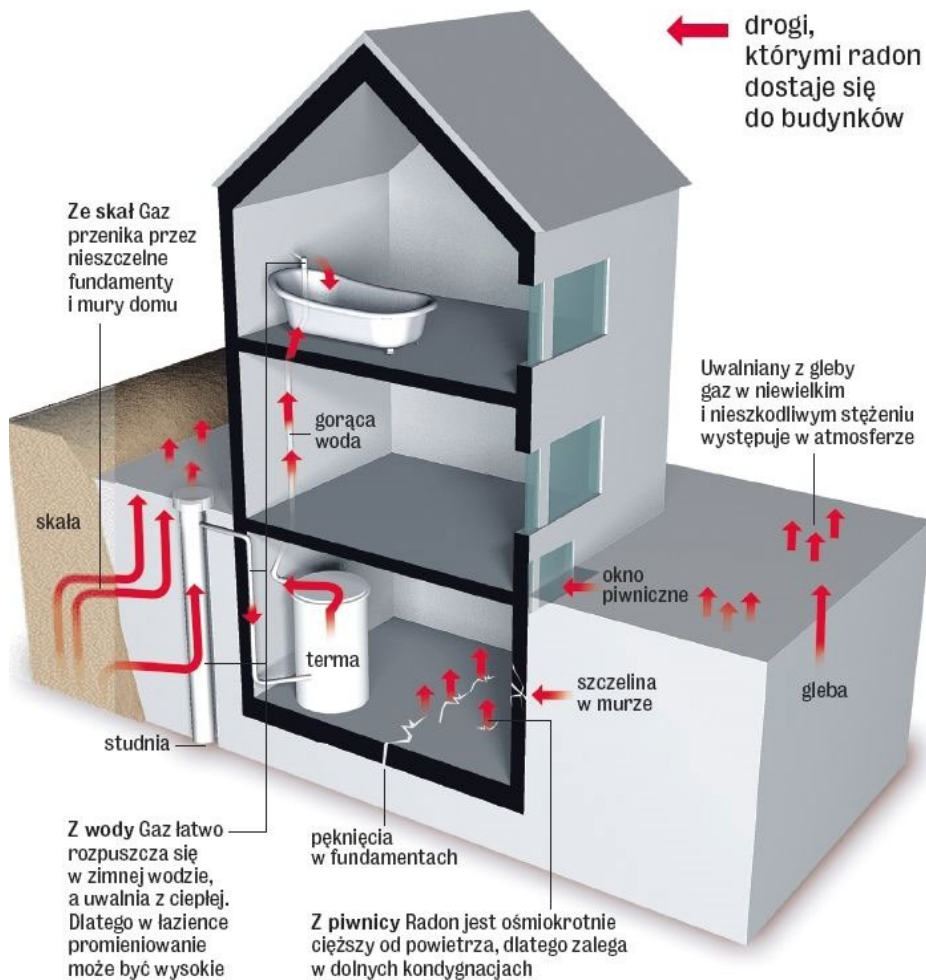
**Radon obecny jest w każdym budynku i mieszkaniu w różnych stężeniach** w zależności od budowy geologicznej terenu, na którym jest posadowiony. Radon powstaje w skałach w skorupie ziemskiej, a następnie migruje na powierzchnię ziemi poprzez uskoki geologiczne, spękania, przepuszczalne gleby. Uwalnianie 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.**(47-49).

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. Radon **do domu przedostaje się z gruntu** w wyniku tzw. efektu kominowego wynikającego z różnicy ciśnień. Radon przenika **przez szczeliny w fundamentach, spękania w murach budynku i podłodze, szczeliny i pęknięcia w wylewkach, przez**



studzienki kanalizacyjne, nieszczelności wokół rur wodno-kanalizacyjnych i przewodów elektrycznych, złącza konstrukcyjne oraz z materiałów budowlanych.



Rycina 3: Drogi wnikania radonu do budynku

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

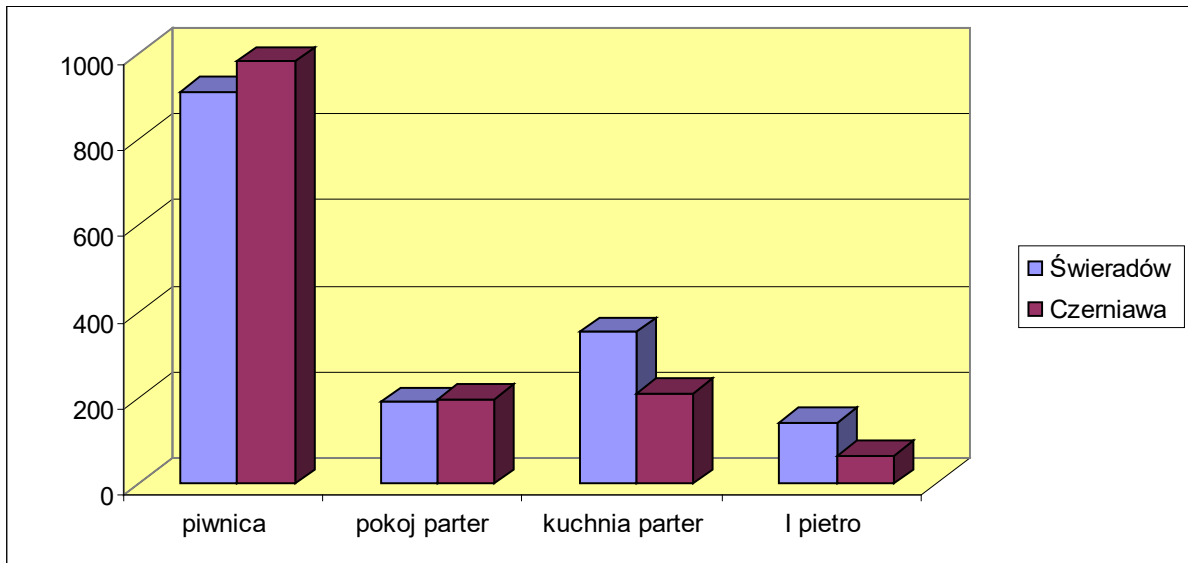
Wewnątrz budynku radon przemieszcza się za sprawą wentylacji grawitacyjnej (naturalny ciąg rozpoczyna się od najniższych partii budynku) rozchodzi się po całym domu wykorzystując kanały wodno-kanalizacyjne, a w budynkach z wielkiej płyty szczeliny pomiędzy płytami (50).



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) (50).

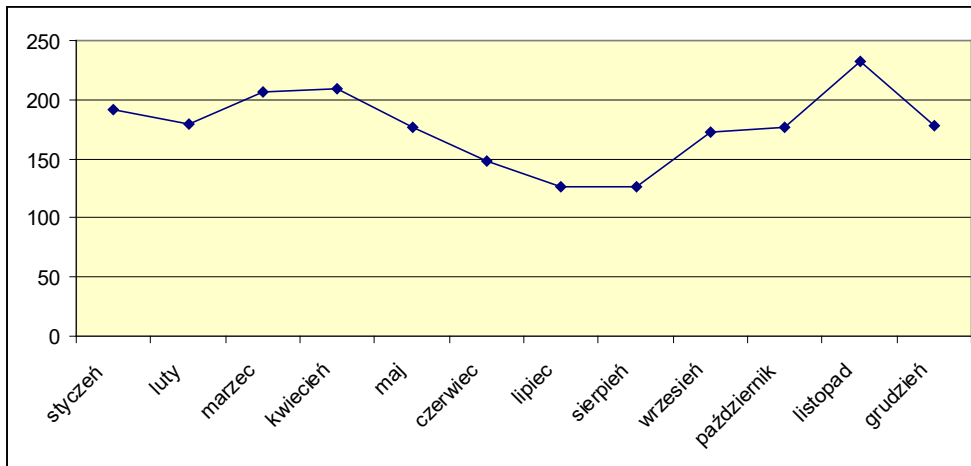
Średnie stężenie radonu w pomieszczeniach mieszkalnych na świecie wynosi około 39 Bq/m<sup>3</sup>, w Europie 21-110 Bq/m<sup>3</sup> (6-7 14, 52). **Średnie stężenia radonu w budynkach w Polsce wynosi 32 Bq/m<sup>3</sup>** wahając się od kilkunastu do kilku tysięcy Bq/m<sup>3</sup>. Pomiary stężenia radonu z 2011 r. wykazały, że najwyższe stężenie radonu w budynkach mieszkalnych występuje w Sudetach (845 Bq/m<sup>3</sup>), a najwyższą średnią geometryczną (231 Bq/m<sup>3</sup>) wykazano na Mazurach i Podlasiu (8, 47, 53-54).

Narażenie na promieniowanie jonizujące wewnątrz budynku jest średnio o kilkadziesiąt procent wyższe niż na zewnątrz (55). Obecność radonu w przyrodzie jest naturalna, ale w domach już nie. Stąd potrzeba redukcji jego stężenia w budynkach. **Szkodliwość radonu** wynika głównie ze stosunkowo szybkiego jego rozpadu prowadzącego do powstania różnorodnych pochodnych, które zatrzymane w płucach prowadzą do kancerogennych uszkodzeń radiacyjnych. W mieszkaniach i w miejscu pracy jesteśmy narażeni na ok. 1/3 dawki promieniowania jonizującego. **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** (56-57). Według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (31) **86 – 90 % radonu w budynkach pochodzi z podłoża, 2 – 5 % z materiałów budowlanych, a mniej niż 1 % z wody**. Jego ilość zależy, więc głównie od typu podłoża, na którym są posadowione budynki.



Rycina 4: Średnie stężenia radonu <sup>222</sup>Rn na poszczególnych kondygnacjach budynków w Bq/m<sup>3</sup> (na podstawie 50).

**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** (58). **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.



Rycina 5: Średnie stężenie radonu w Bq/m<sup>3</sup> w mieszkaniach w Polsce w poszczególnych miesiącach (na podstawie 58 )

### 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 (55). 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 (59). 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 (60-61).

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 61).

*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:*

*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

### *Metody specjalistyczne*

- 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.

## Piśmiennictwo

1. Gostkowska B. (1992) Fizyczne podstawy ochrony radiologicznej. *CLOR*, Warszawa.
2. UNSCEAR, 2008. Sources of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Report of General Assembly with annexes. New York, United Nations.
3. Strzałkowski A. (1978). Wstęp do fizyki jądra atomowego. *PWN*. Warszawa.
4. Novelline R. (1997) Squire's Fundamentals of Radiology. *Harvard University Press*. 5th edition.
5. Encyklopedia Fizyki, 1974
6. Cothorn C.R., Smith, Jr., J.E.: „Environmental Radon”, Environmental Science Research, Volume 35, Plenum Press, New York 1987.
7. Radiomolecule Data, 1987; Environmental Molecules Laboratory US, section 5, vol 1, Dept of Energy, 28th edition
8. Raport Prezesa PAA, 2022
9. Atlas Radiologiczny Polski 2011. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Biblioteka Monitoringu Środowiska 2012.
10. Szot Z.: Radon w środowisku oraz skutki ich wniknięcia do organizmu człowieka. *Postępy Techniki Jądrowej*, 1993; 36(1-2) Warszawa
11. Fuks L., Mamont-Cieśla K., Kusyk M.: Badania polskich węgla aktywnych przeznaczonych do sorpcji i detekcji radonu. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2000.
12. Mostafa A.M.A, Tamaki K., Moriizumi J. I et al.: The weather dependence of particle size distribution of indoor radioactive aerosol associated with radon decay products. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011; 146(1-3): 19-22.
13. Biliska I.: Wpływ radioaktywnego radonu i jego pochodnych na zdrowie człowieka. *Environ Med* 2016, 19, 1: 51-56.
14. Kim S.H., Hwang W.J., Cho J.S., et al. Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure. *Ann Occup Environ Med*. 2016; 28;1 - 8.
15. Li C., Wang C, Yu J. et al.: Residential Radon and Histological Types of Lung Cancer: A Meta-Analysis of Case-Control Studies. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17: 1457.
16. Duan P, Quan C, Hu C et al. (2015) Nonlinear dose-response relationship between radon exposure and the risk of lung cancer: Evidence from a meta-analysis of published observational studies. *Eur J Cancer Prev* 24(4), 267-77.
17. Cheng E.S., Egger S., Hughes S. et al.: Systematic review and metaanalysis of residential radon and lung cancer in never-smokers. *Eur Respir Rev* 2021; 30(159): 200230.
18. Moon J., Yoo H.: Residential radon exposure and leukemia: A meta-analysis and dose-response meta-analyses for ecological, case-control, and cohort studies. *Environ Res* 2021; 202: 111714
19. Field et al 2014 Field, R. William. „Radon Occurrence and Health Risk” . Department of Occupational and Environmental Health, University of Iowa. .
20. Mnich Z., Karpińska M., Kapała J. et al.: Radon concentration in hospital buildings erected during the last 40 years in Białystok, Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004; 75: 225-232.
21. Rericha, M. Kulich, R. Rericha, D.L. Shore et al.. Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Health Perspect*. 114 (6), 818–822, 2006.
22. Dumieński M.: Narażenie na ołów. Broszura dla pracowników wykonujących pracę w narażeniu na ołów. Fundacja na rzecz dzieci „Miasteczko Śląskie”, Miasteczko Śląskie 2008.
23. Lebecka J.: Radon w kopalniach. Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna. *Biuletyn informacyjny PAA*. 1995, 23: 21-39.
24. Harat A., Rogala D., Leksowski K.: Rak płuca w kontekście czynników cywilizacyjnych i polityki zdrowotnej Polski oraz Unii Europejskiej. *Pielęgniarstwo polskie*. 2014, 2(52): 144-149.
25. BEIR VI. Health effects of exposure to radon. National Academy Press, Washington, D.C., 1999.

26. World Health Organization/ WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO; 2009: 1-94.
27. Grzywa-Celińska A., Krusiński A., Mazur J. et al.: Radon-The Element of Risk. The Impact of Radon Exposure on Human Health. *Toxics* 2020; 8: 120
28. IARC, 2012 *IARC* (2012). IARC Monographs on the Identification on Carcinogenic Hazards to Human. International Agency for Research on Cancer. Volume 100D. Radiation. World Health Organization, 2012.
29. Zatonski W.: (red.) Europejski Kodeks Walki z Rakim Ministerstwo Zdrowia. Warszawa, 2011
30. Allison W (2009) Radiation and reasonWade Allison Publishing, 2009.
31. EPA, *Environmental Protection Agency USA* National Radon Action Month. 2014
32. Lino AR, Abrahao CM, Amarante MP, et al. The role of the implementation of policies for the prevention of exposure to Radon in Brazil - a strategy for controlling the risk of developing lung cancer. *Ecancermedicalscience*. 2015; 14; 9: 572.
33. Yoon JY, Lee JD, Joo SW, et al. Indoor radon exposure and lung cancer: a review of ecological studies. *Ann Occup Environ Med*, 2016; 28; 1-15.
34. Papastefanou C.: Radioactivity of tobacco leaves and radiation dose induced from smoking. *Int J Environ Res Public Health*. 2009, 6(2): 558-567.
35. Glantz S.A., Palmrey W.W.: *Passive smoking and heart disease*. Epidemiology, physiology and biochemistry. *Circulation*. 1991, 83: 1-12.
36. AGiR, 2001. Radon and public health. Report of Independent Advisory Group on Ionizing Radiation. Chilton, Doc. HPA, 2009, RCE-11, 1-240.
37. Konys J., Mackiewiczowa U.: Wpływ promieniowania niskich aktywności na ustrój pracowników zatrudnionych przy zabiegach radonowych w Łądku Zdroju i Świeradowie Zdroju. *Balneologia Polska*. 1972, tom XII, z. 1/2: 39-46.
38. Kochański J.W.: Kuracja w Łądku Zdroju. *Łądek Zdrój* 1992.
39. Morinaga H.: Medical experiences in the Japanese radon spa Misasa. *Z. Phys. Med. Baln. Med. Wochenschr*. 1998; 97: 332-333.
40. Academie de Science – Akademie Nationale de Medicine (2005) Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation
41. Halawa B.: Mechanizm działania radonu na organizm ludzki w świetle badań własnych. *Problemy Uzdrawiskowe*. 1987; 1-2: 45-52.
42. Instytut Medycyny Uzdrawiskowej. Tymczasowa instrukcja stosowania naturalnych tworzyw balneoterapeutycznych zawierających radon-222 i pochodnych. Poznań, 1988.
43. Joss A., Kochański J.W., Karasek M.: Radonoterapia w chorobach naczyń obwodowych. *Folia Medica Lodziensia*. 2002; 29: 79-93.
44. Halawa B.: Wpływ radonu uwalnianego z wody w czasie kąpieli radoczynnej na radioaktywność krwi i przepływ krwi. *Pol. Tyg. Lek*. 1973; 28: 1638-1640.
45. Peterman B.F., Prekins C.J.: Dynamics of radioactive chemically inert gases in the human body. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1988; 22: 5-12.
46. Franke A., Reiner L., Resch K. L.: Long-term benefit of radon spa therapy in the rehabilitation of rheumatoid arthritis: a randomized, double-blinded trial. *Rheumatol Int* 2007; 27(8): 703-713.
47. Korzeniowska-Rejmer E (2008) Radon w gruncie i techniki redukcji jego stężenia w obiektach budowlanych. *CzT, R105, z I-Ś*, 73-88.
48. Mamont-Cieśla K. (2012). Radon – promieniotwórczy gaz w środowisku człowieka. *Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej*
49. 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



50. Pachocki KA, Gorzkowski B, Różycki Z et al. (2000) Radon  $^{222}\text{Ra}$  w budynkach mieszkalnych Świeradowa Zdroju i Czerniawy Zdroju. Roczn. PZH, 51(3), 291-8.
51. Fujimoto K, Sanada T. (1999) Dependence of Indoor Radon Concentration on the Year of House Construction. Health Phys. 77, 410-419.
52. Olszewski J, Zmyślony M, Wrzesień M et al. (2015) Occurrence of radon in the Polish underground tourist routes. Med Pr., 66(4), 557-63.
53. Przylibski TA, Żebrowski A, Karpińska M et al. (2011) Mean annual  $^{222}\text{Rn}$  concentration in homes located in different geological regions of Poland – first approach to whole country area. J Environ Radioact, 102(8), 735-41.
54. Gawełek, E.; Drozdowska, B.; Fuchs, A. (2017) Radon as a risk factor of lung cancer. Przegl. Epidemiol., 71, 90–98.
55. Dohojda M (2004) Prognozowanie stężenia aktywności radonu w pomieszczeniach zamkniętych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej. Kwartalnik nr 1 (129).
56. Nazaroff WW, Nero AV (1988) Radon and Its Decay Products in Indoor Air. John Wiley and Sons. New York
57. Mamont-Cieśla K (1993) Radon w mieszkaniach. Przegląd Budowlany, 7.
58. Kozak K., Mazur J., Kozłowska B. 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.
59. Raport roczny za 2017. CLOR 22.03.2019
60. Krawczyk M. (1992) Promieniotwórczość naturalna materiałów budowlanych. Materiały Budowlane, nr 8-9, s. 23-25 i nr 10, 1992, s. 23-26.
61. Brukarski L, Dohojda M (1999) Promieniowanie jonizujące w budynkach wielkopłytowych. Prace Instytutu techniki Budowlanej. Kwartalnik nr 1(109)18. NCRP Report, 1989, 103.